

テーマA 「直面する地球環境変動の予測と診断」

課題(i) 直面する気候変動に関する要因の特定とメカニズムの解明

課題(ii) 地球環境変動研究を支える統合的予測システムの開発



我々が行ってきたこと

いま起きている気候変動を解明し、将来を
予測する—気候変動対策の基本情報を提供

□ イベント・アトリビューション (EA)

個別の異常気象に温暖化はどのくらい影響していた？

□ 気候変動の要因分析とメカニズム理解

近年、「温暖化が止まった」と言われているが本当か？

□ 気候の予測、予測システム開発

近い未来の気候変動は予測できるか？過去の復元は可能か？

□ 気候感度問題への挑戦

気候予測の不確実性低減は可能か？



主要成果 (2012-2015)

- 気候変動の予測と要因究明
- 予測のためのモデル・システム開発

- 論文 (225篇)
- プレスリリース (7回)
- メディア取材、出演 (112回)
- アウトリーチ(講演等) (77回)
- 受賞 (6名)



Contribution of natural decadal variability to global warming acceleration and hiatus

Masahiro Watanabe^{1*}, Hideo Shiogama², Hiroaki Tatebe³, Michiya Hayashi¹, Masayoshi Ichii⁴ and Masahide Kimoto¹



Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in the past decades

Masato Mori^{1*}, Masahiro Watanabe¹, Hideo Shiogama², Jun Inoue³ and Masahide Kimoto¹

ARTICLE

Received 17 Oct 2014 | Accepted 6 Mar 2015 | Published 21 Apr 2015

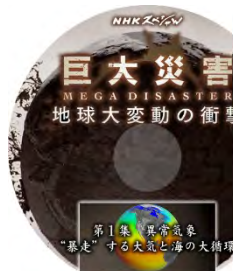
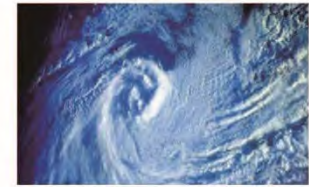


Skilful multi-year predictions of climate variability

Yoshimitsu Chikamoto¹, Axel Timmermann^{1,2}, Jing-Jia Luo³, Takashi M. Masahiro Watanabe⁴, Masayoshi Ishii⁵, Shang-Ping Xie⁷ & Fei-Fei Jin⁸

International Workshop on RISK INFORMATION ON CLIMATE CHANGE

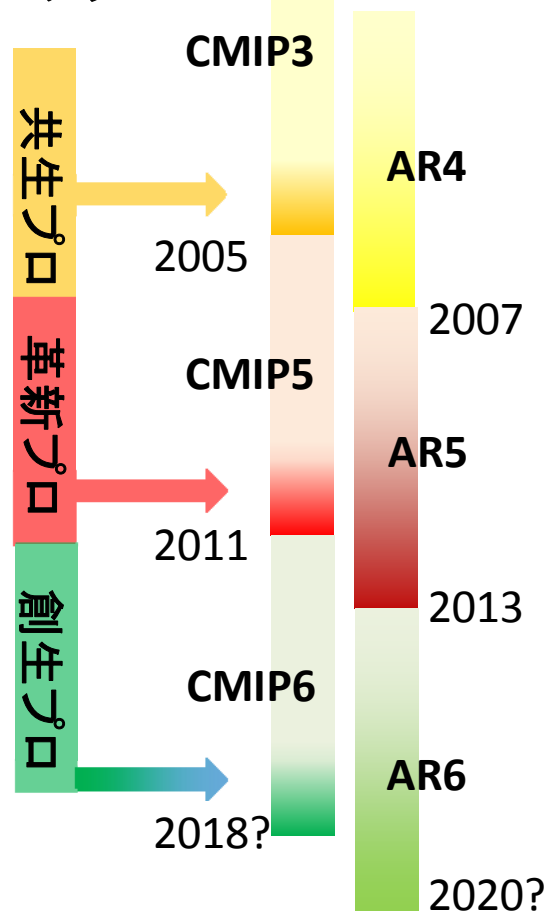
25-27 November 2014
Yokohama, Japan



国際コミュニティへの貢献

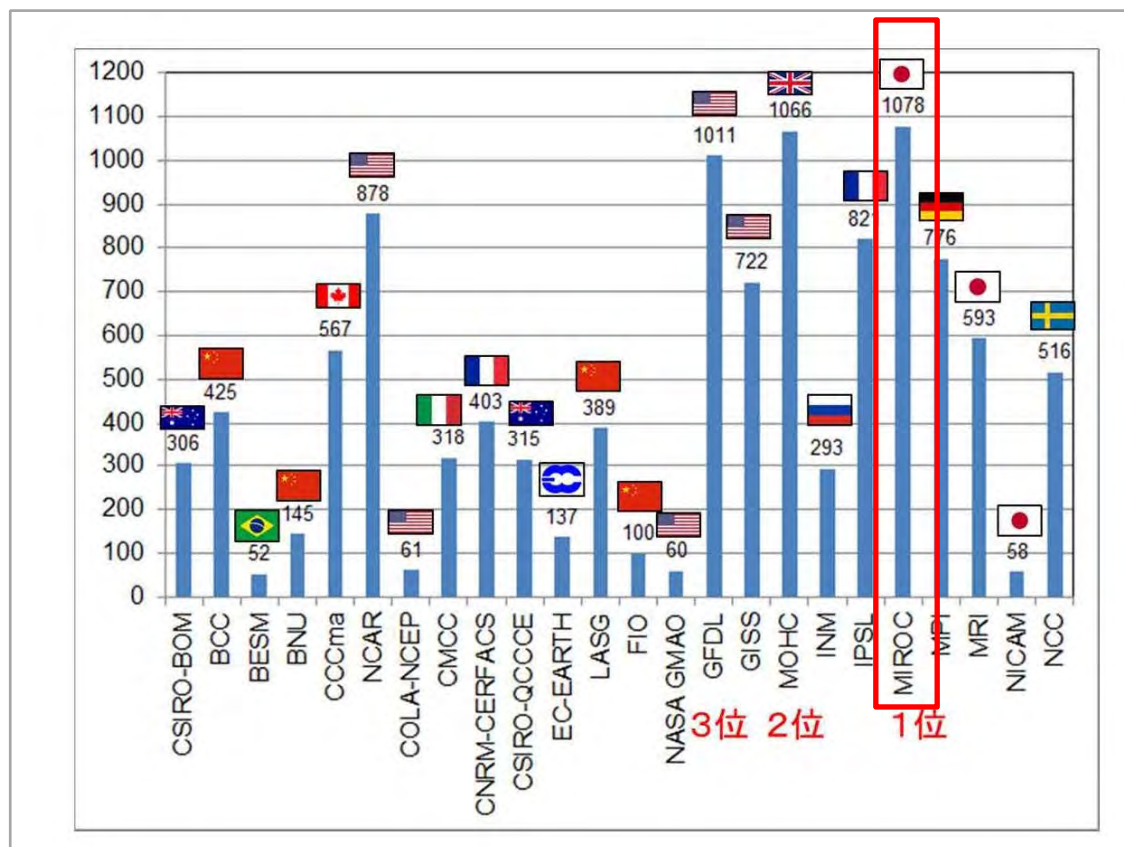
Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)

CMIP/IPCCと日本の温暖化研究
プログラム



CMIP5において、我が国の気候モデル(MIROC)
の被引用数が世界一を記録(2014年)

モデル引用数



環境エネルギー課作成資料(2014年11月21日)より抜粋



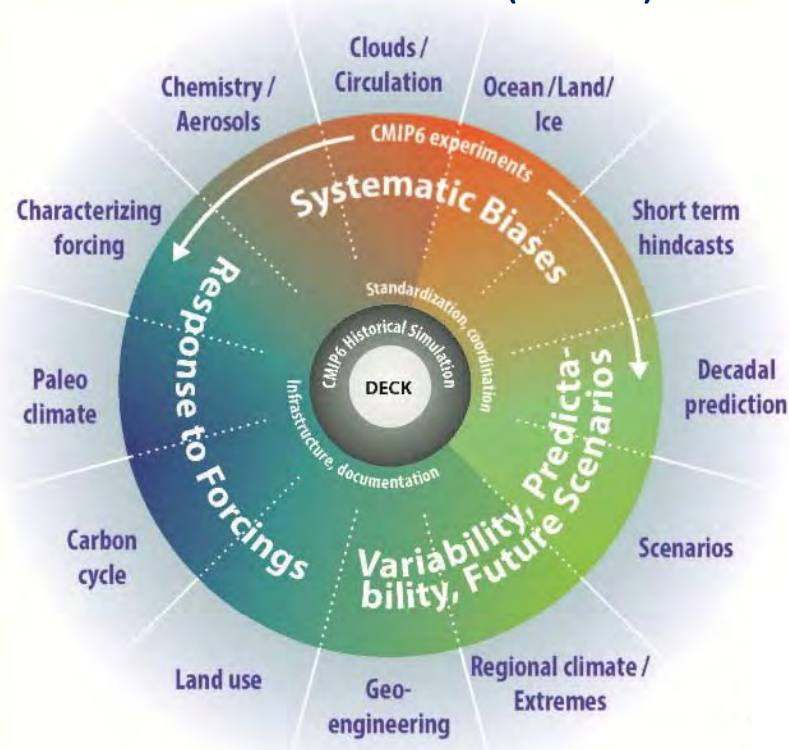
SOUSEI Program for Risk Information
on Climate Change

気候変動リスク情報創生プログラム

国際コミュニティへの貢献

Coupled Model Intercomparison Project (CMIP): From phase 5 to 6

CMIP6 structure (2016-)



日本の気候科学者はCMIP(実行と解析)を通じてIPCC評価報告書に貢献

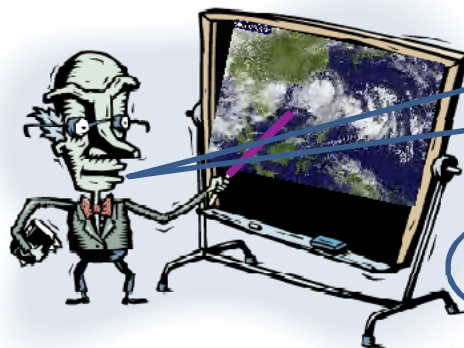
この貢献は今後も続けなければいけない！

MIROCグループはCMIP6に深くかかわっている
(22のMIPsのうち半数にSSCメンバーとして参画)

異常気象と気候変化

Q. (例えば)この夏の異常気象はどこまで温暖化のせい？

A.



個々の異常気象「イベント」を温暖化のせいにはできない

でもイベントが起こりやすかったかどうかは部分的に気候変化のせいではないの？



異常気象と気候変化

Q. 特定の異常気象「イベント」はどこまで温暖化のせい？

個々のイベントの発生は自然のゆらぎ⇒たまたま暑い夏、寒い夏が起き得る



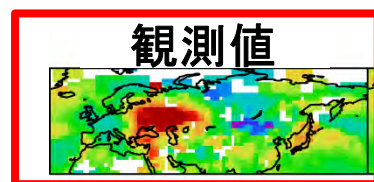
異常気象と気候変化

Q. 特定の異常気象「イベント」はどこまで温暖化のせい？

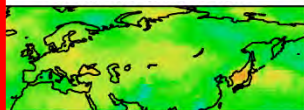
気候の変化はイベントの「起こりやすさ」を変える



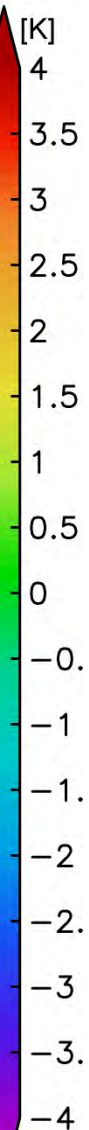
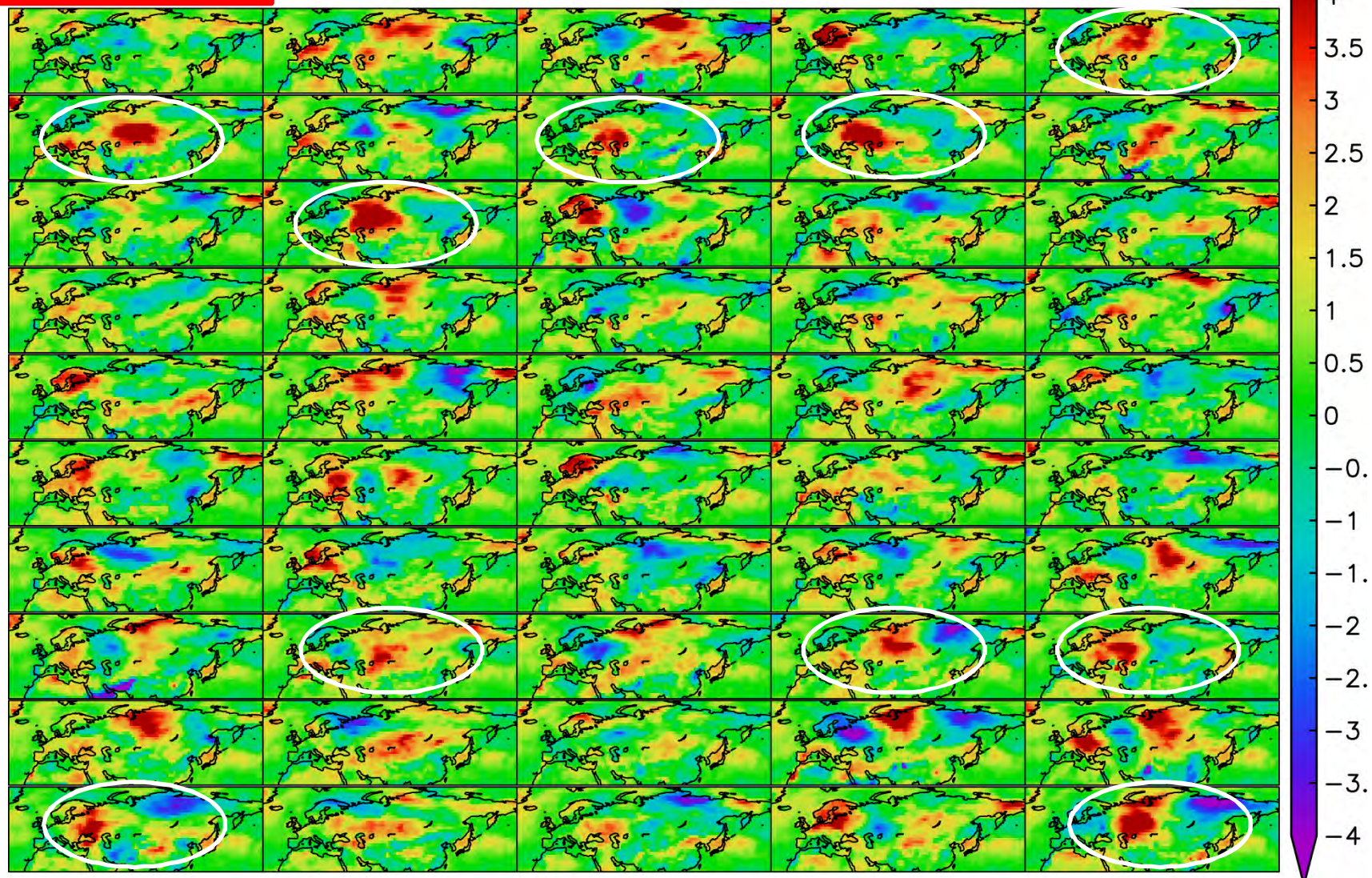
異常気象「曼荼羅」



モデル平均



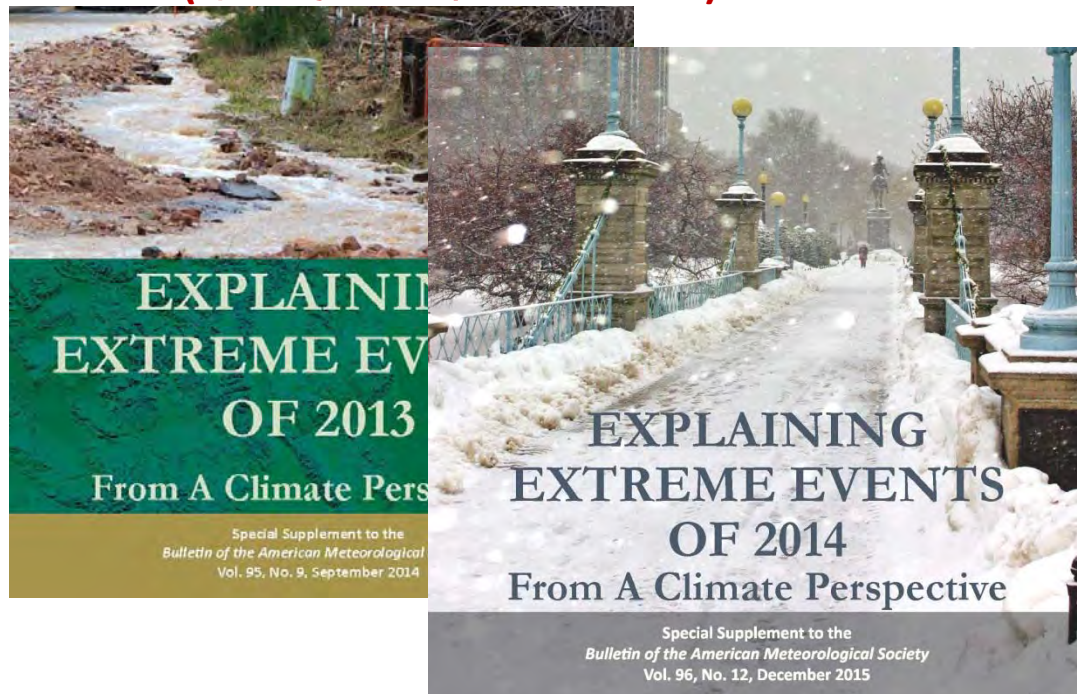
MIROC5 AGCMがシミュレートした2010年
8月の地表気温偏差



イベント・アトリビューション (EA)

- 過去の異常気象に対する温暖化の寄与を確率的に特定
- 世界的に活発化している新しいタイプの研究
- 近年の多数のイベントに適用済

毎年のイベントに対する成果を出版
(米気象学会特別レポート)



15. THE CONTRIBUTION OF ANTHROPOGENIC FORCING TO THE JAPANESE HEAT WAVES OF 2013

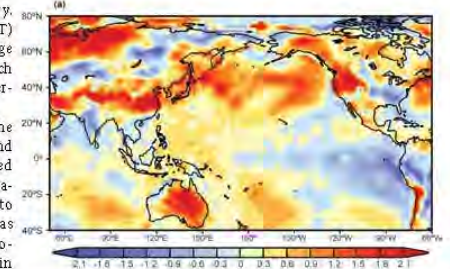
YUKIKO IMADA, HIDEO SHIOGAMA, MASAHIRO WATANABE, MASATO MORI,
MASAYOSHI ISHII, AND MASAHIKE KIMOTO

Anthropogenic climate change played a significant role in increasing the probability of events such as the heat wave in Japan in 2013.

Introduction. During the boreal summer of 2013, Japan experienced extraordinarily high temperatures: record-breaking daily maximum temperatures at 143 sites in the west of the country. Daily mean surface air temperature (SAT) was 1.2°C warmer than normal on average in July and August in western Japan, which was above the 90th percentile for the reference period of 1979–2012.

This heat wave was characterized by the intensification of both the Pacific high and the Tibetan high. Figure 15.1 shows observed anomalies of surface temperature, circulation, and convective activity from July to August 2013. Active convective heating, as indicated by negative anomalies in outgoing longwave radiation, was observed in

eral circulation model (AGCM) under two specific boundary conditions for July and August 2013. We

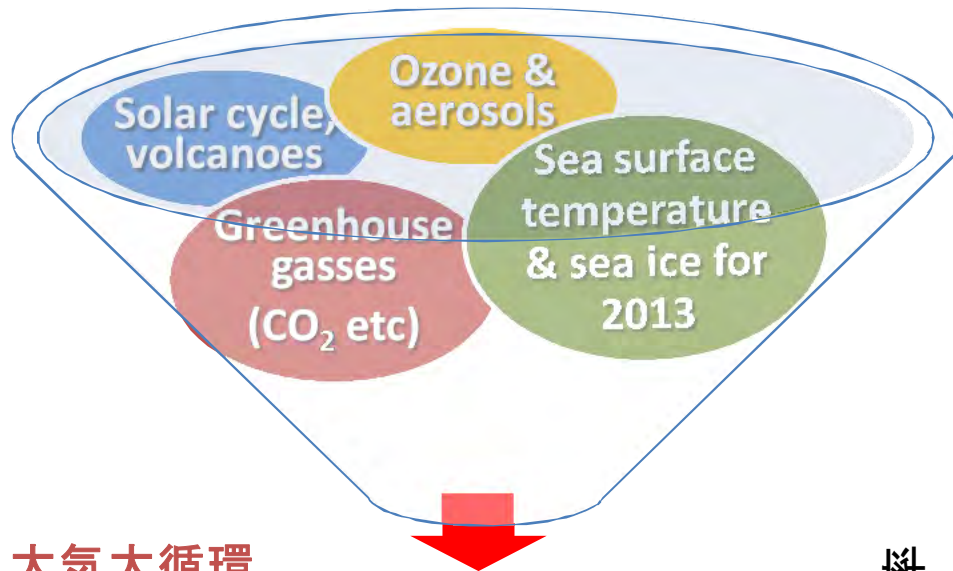


Imada et al. (2014 BAMS)

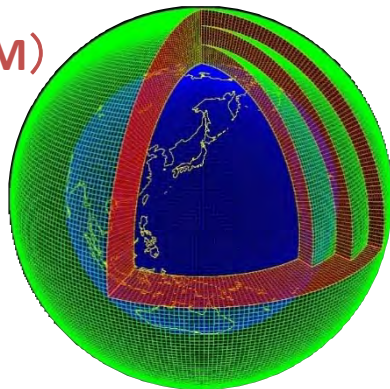
具体的にどうやるの？

Weather pinball

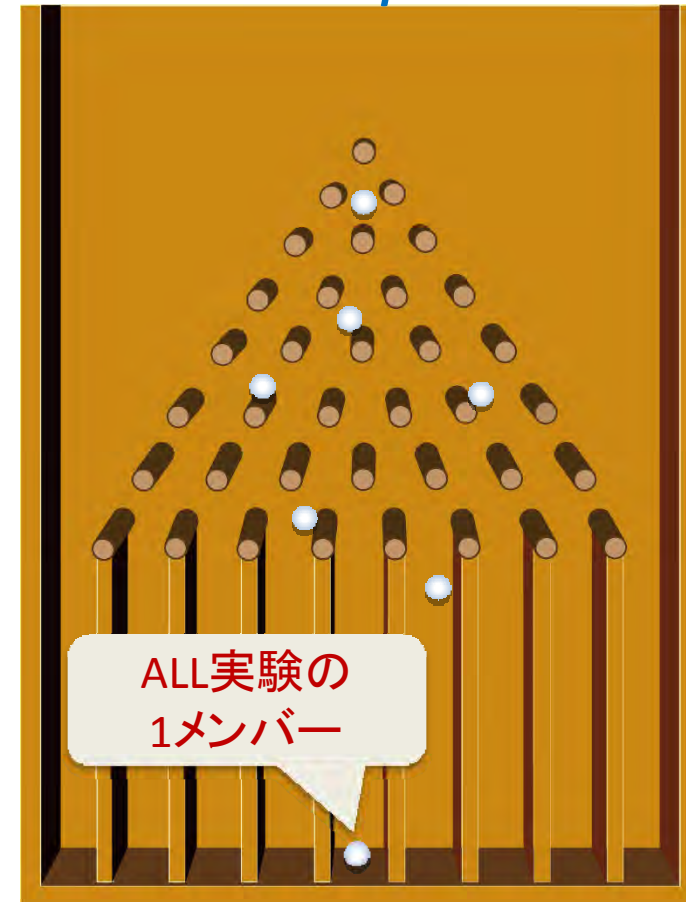
再現実験 (ALL)



大気大循環
モデル (AGCM)



発生確率



ALL実験の
1メンバー

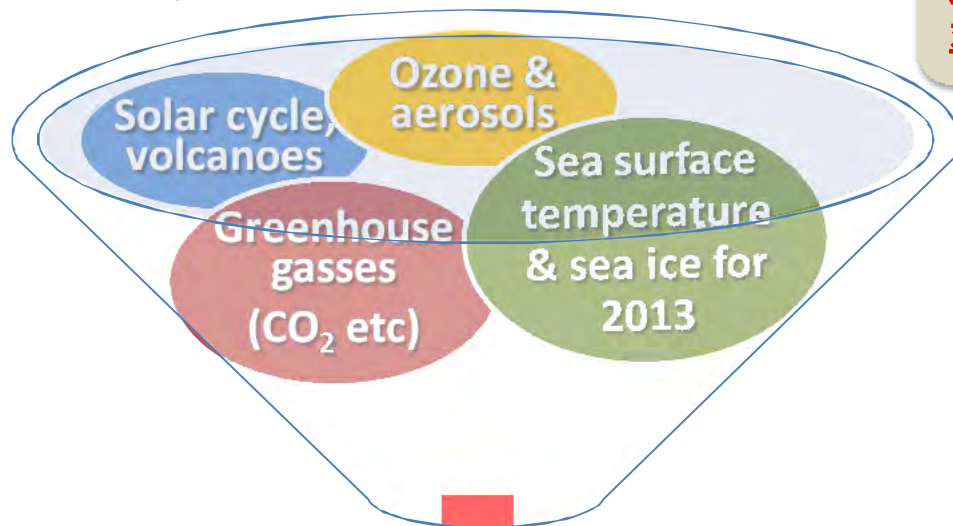
地表気温

2013年夏の
熱波

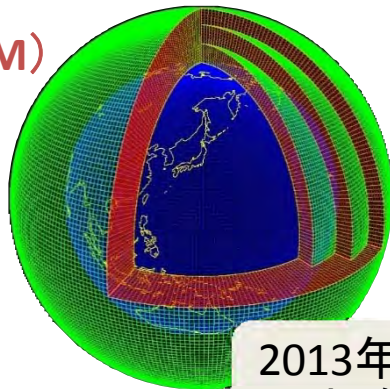
slide courtesy of M Mori

具体的にどうやるの？

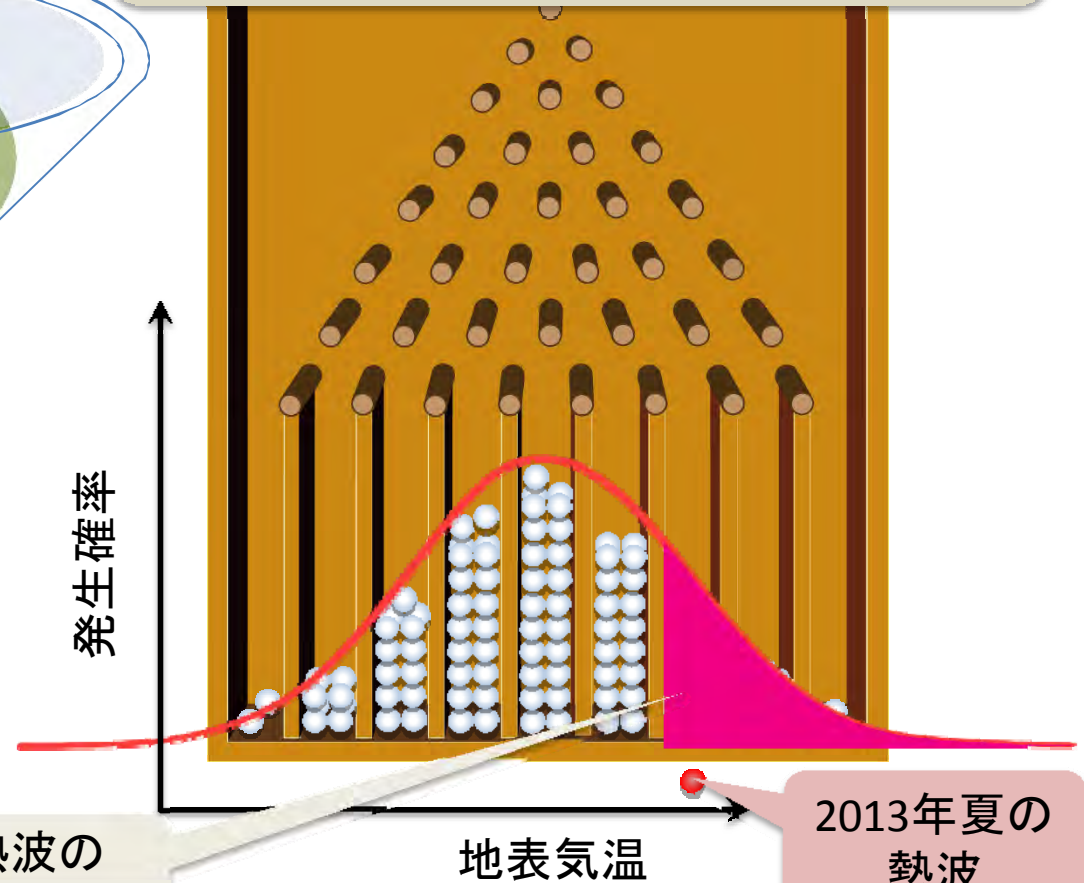
再現実験 (ALL)



大気大循環
モデル (AGCM)

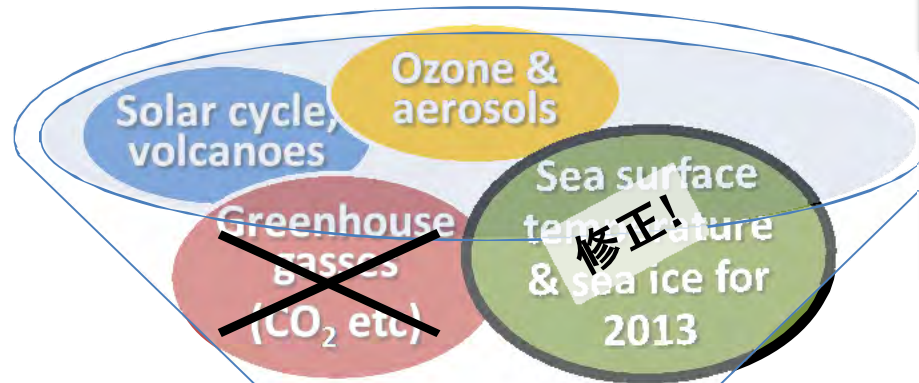


2013年夏季のシミュレーションを100回繰り返す(アンサンブル)ことで、熱波の発生確率を推定する



具体的にどうやるの？

非温暖化実験(NAT)



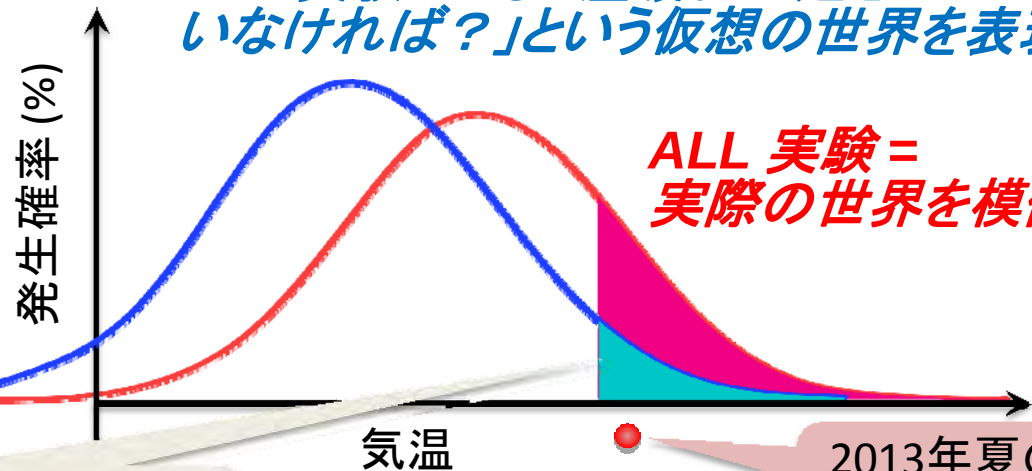
大気大循環
モデル(AGCM)

2013年夏季のシミュレーションを100回繰り返す(アンサンブル)ことで、熱波の発生確率を推定する

ただし、温室効果気体は1850年時点で固定、海面水温などから温暖化による長期変化成分を取り除く

NAT 実験 = 「もし温暖化が起きていなければ？」という仮想の世界を表現

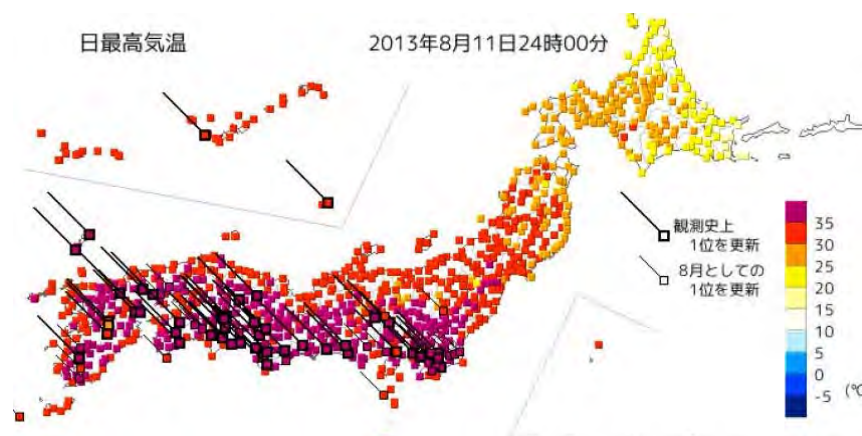
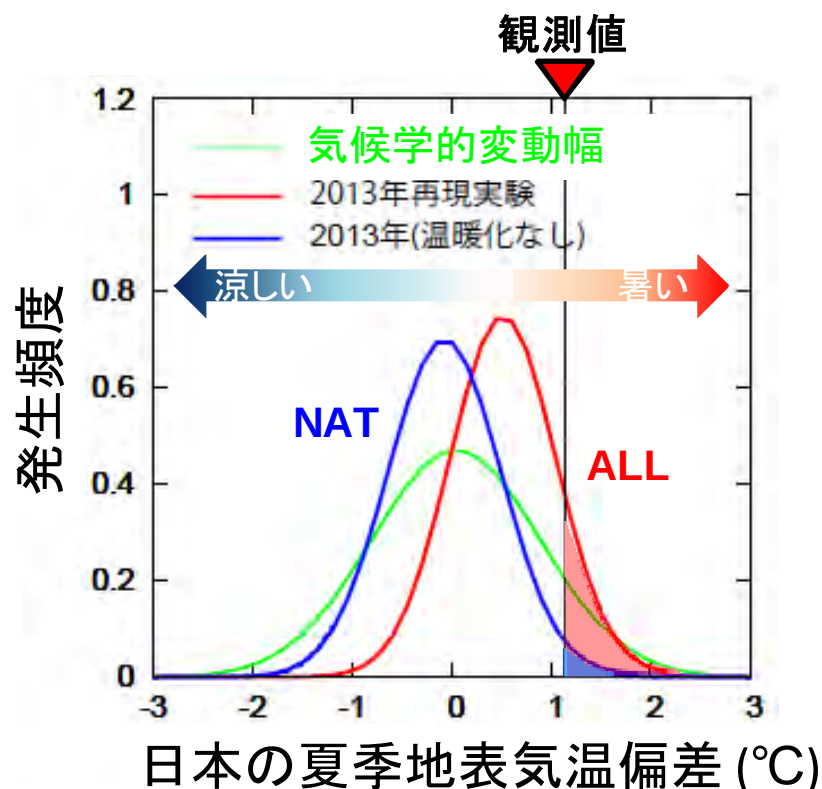
ALL 実験 =
実際の世界を模倣



人為起源温暖化はこのイベントの発生リスクを $XX-YY\%$ 増加させた

2013年夏の
熱波

2013年日本の猛暑に対するEA



観測と同程度以上の猛暑の発生確率 (P)

ALL (P_0)	NAT (P_1)	FAR ($1-P_1/P_0$)
12.4%	0.5–1.73%	0.86–0.96

Imada et al. (2014, BAMS)

Fractional Attributable Risk (FAR): 人間活動の寄与の目安
(~1: 人為起源温暖化の寄与が明らか、~0: 温暖化の寄与はなし)

EA研究の課題と発展

□ 現時点で可能なこと

- 大規模な大気場の変動に起因する猛暑・寒波などの異常気温イベント(2週間～1ヶ月よりも長い時間スケール)

□ 現時点で困難なこと

- 降水イベント(洪水、干ばつなど)
- 台風や豪雨などの比較的短時間のイベント

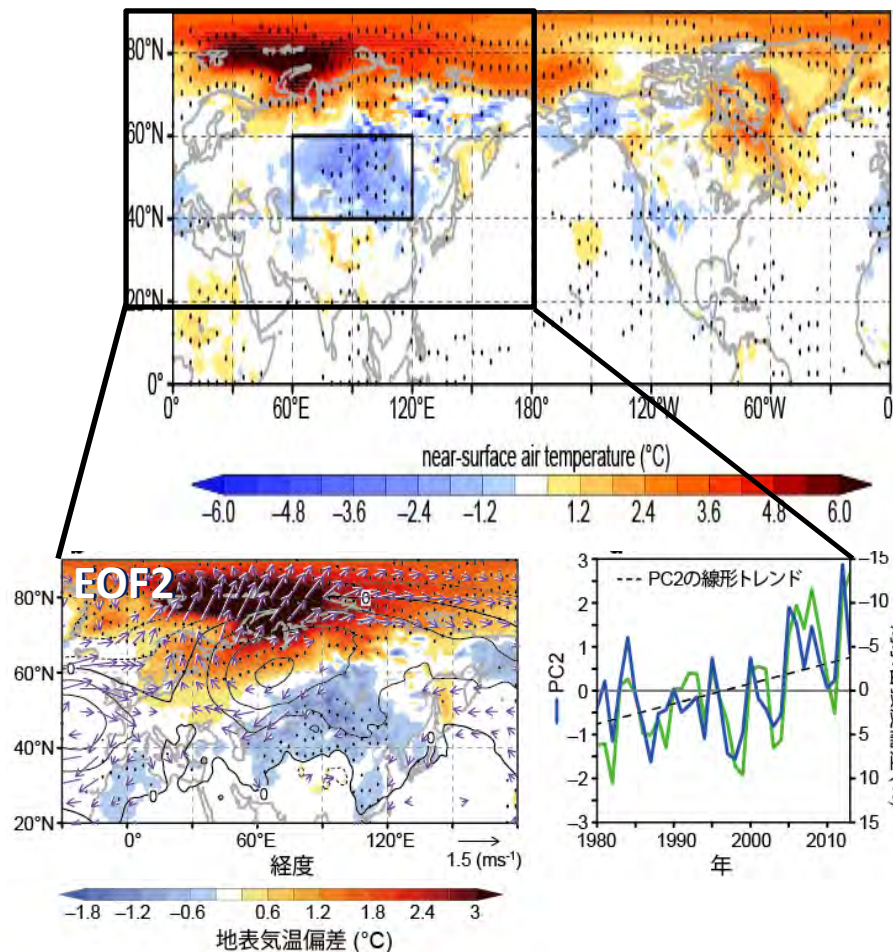
□ EAのエッセンス

多くのサンプルを作り出すこと

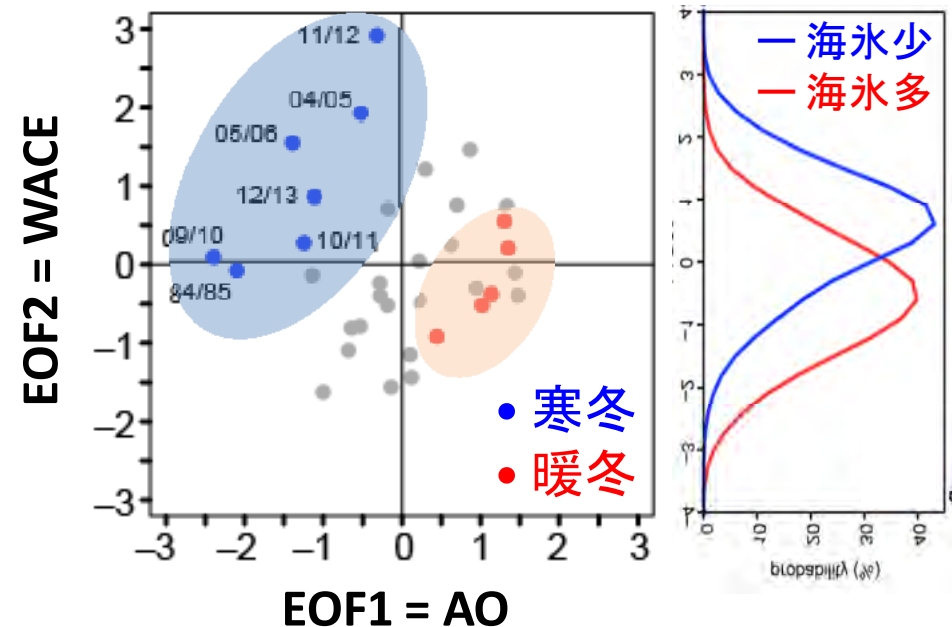
⇒ 同じような大きなアンサンブルを長期間で生成すれば、より多くの気象・気候変動に対する要因分析が可能に

近年の寒冬の要因分析

観測された近年の冬季気温偏差
(1994-2003 ⇒ 2004-2013)



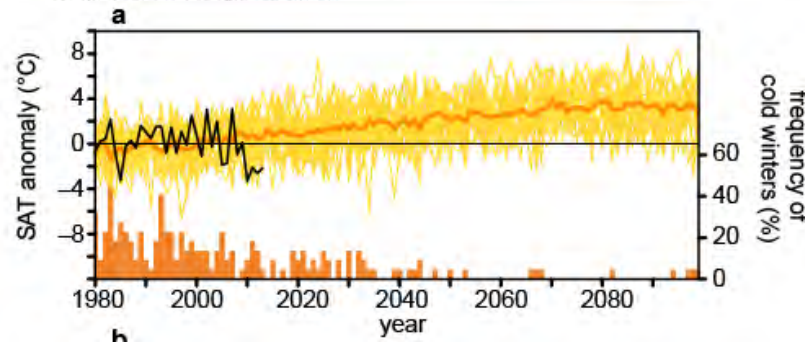
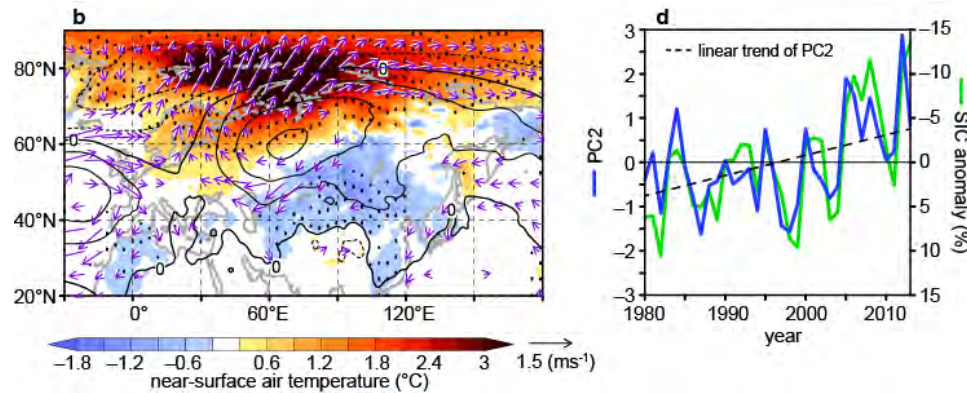
MIROC4 AGCM 100メンバーアンサンブル
によるバレンツ・カラ海水感度実験



Mori et al. (2014 Nature Geo)

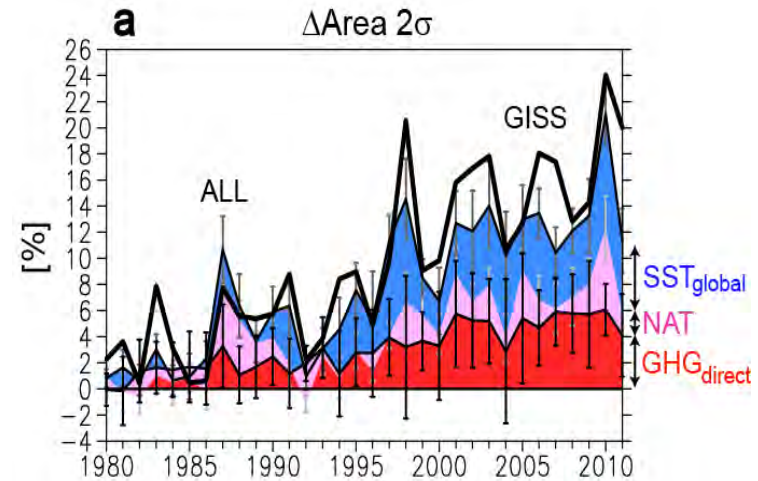
- EOF2=Warm Arctic and Cold Eurasia (WACE)
- ユーラシアの冬季気温偏差はAO と WACE (バレンツ・カラ海の海水変動が駆動) で説明可

温暖化のはずなのに 最近は寒冬続き... ?



Mori et al. (2014; Nature Geosci)

2000年代は猛暑が多いが、 理由は？



- ✓ シミュレーションは過去の熱波頻度の増大をよく再現
- ✓ 短期的な変化(10年程度)には温暖化(CO_2 による陸面加熱)とSST自然変動が重要

Kamae et al. (2014; GRL)

地球温暖化施策決定に資する気候再現・ 予測実験データベース（d4PDF）



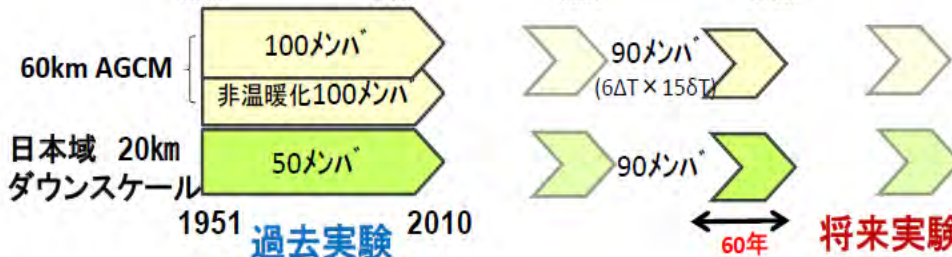
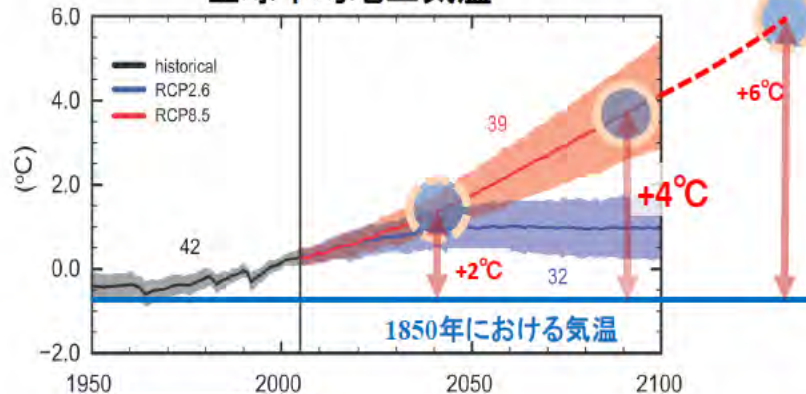
文部科学省気候変動リスク情報創生プログラム主導

気象研究所・東京大学大気海洋研究所・京都大学防災研究所・国立環境研究所・海洋研究開発機構・筑波大学

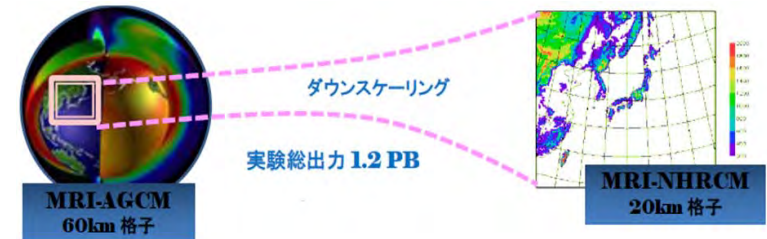
実験デザイン

過去 15,000 年分、将来 10,800 年分 (+4°Cのみ) を積分
総出力データ 2PB
作業日数 180 日、ES最新機 12% の計算資利用

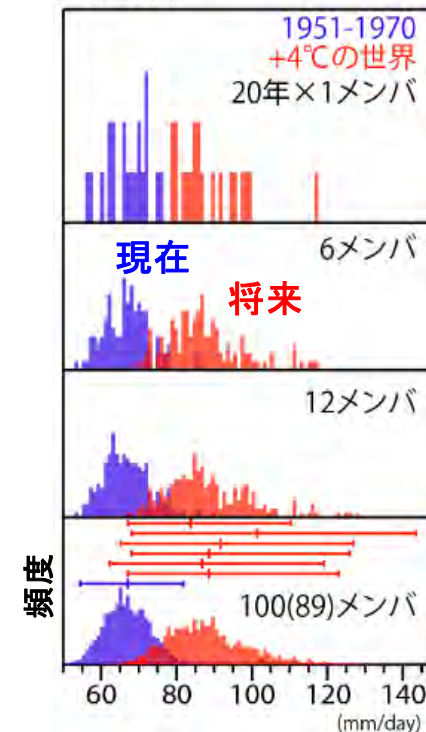
全球平均地上気温



過去と将来の気候をシミュレートする、
これまでにない多数事例の実験データベース



中国南部で平均した「年最大日降水量」
の頻度分布



(例)
豪雨の
頻度分布

これまで不可
能だった発生
頻度の低い異
常気象の変化
を確率的に見
積もることが
初めて可能に

地球温暖化施策決定に資する気候再現・ 予測実験データベース（d4PDF）



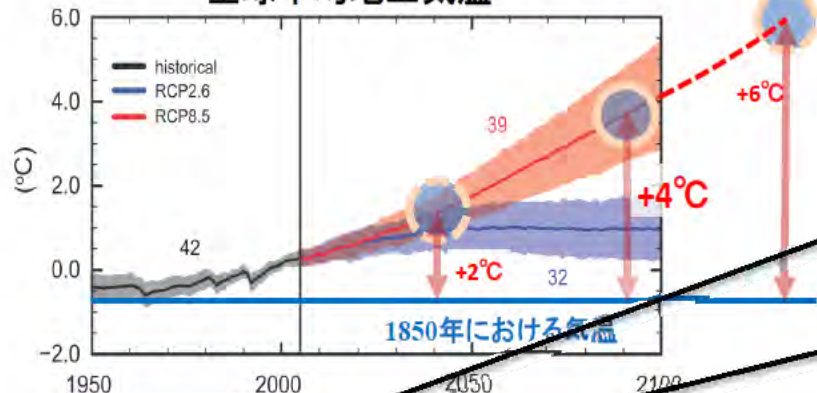
文部科学省気候変動リスク情報創生プログラム主導

気象研究所・東京大学大気海洋研究所・京都大学防災研究所・国立環境研究所・海洋研究開発機構・筑波大学

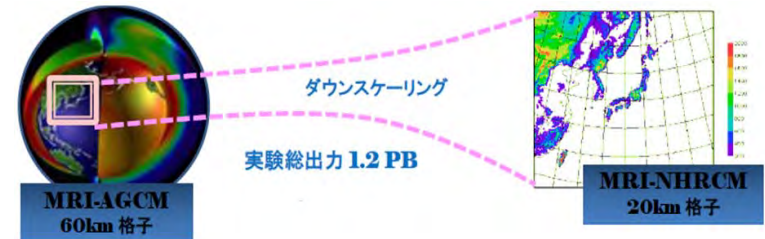
実験デザイン

過去 15,000 年分、将来 10,800 年分 (+4°Cのみ) を積分
総出力データ 2PB
作業日数 180 日、ES最新機 12% の計算資利用

全球平均地上気温



過去と将来の気候をシミュレートする、
これまでにない多数事例の実験データベース



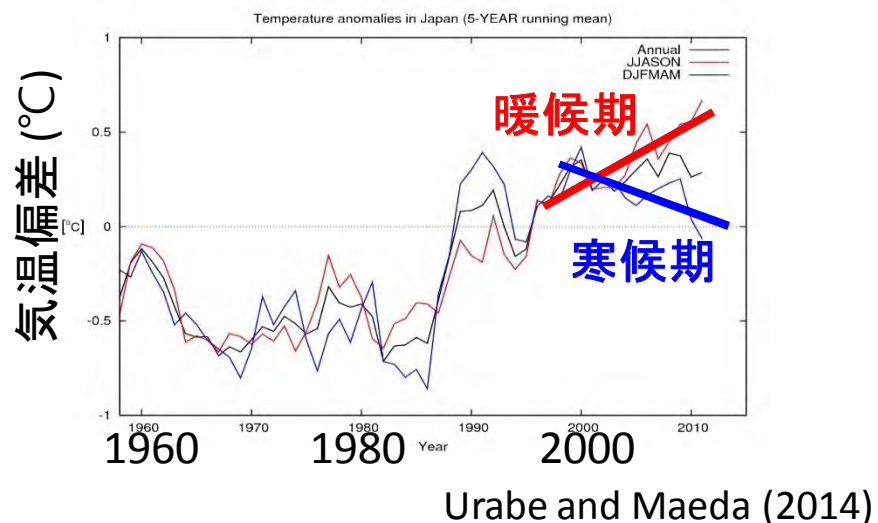
過去再現実験

非温暖化実験：
温暖化が進行しなかった
仮想の気候をシミュレート

既に進行している温暖化が過去に
起こった異常気象にどの程度影響
していたかを評価するイベント・ア
トリビューション研究にも利用可能

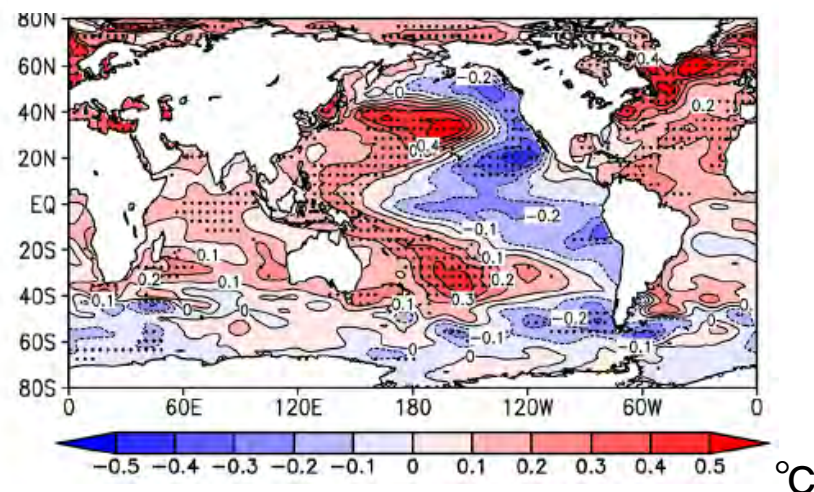
2000年代の日本の夏の気温上昇

日本の地表気温偏差



太平洋10年規模変動

1999-2012年平均海面水温偏差

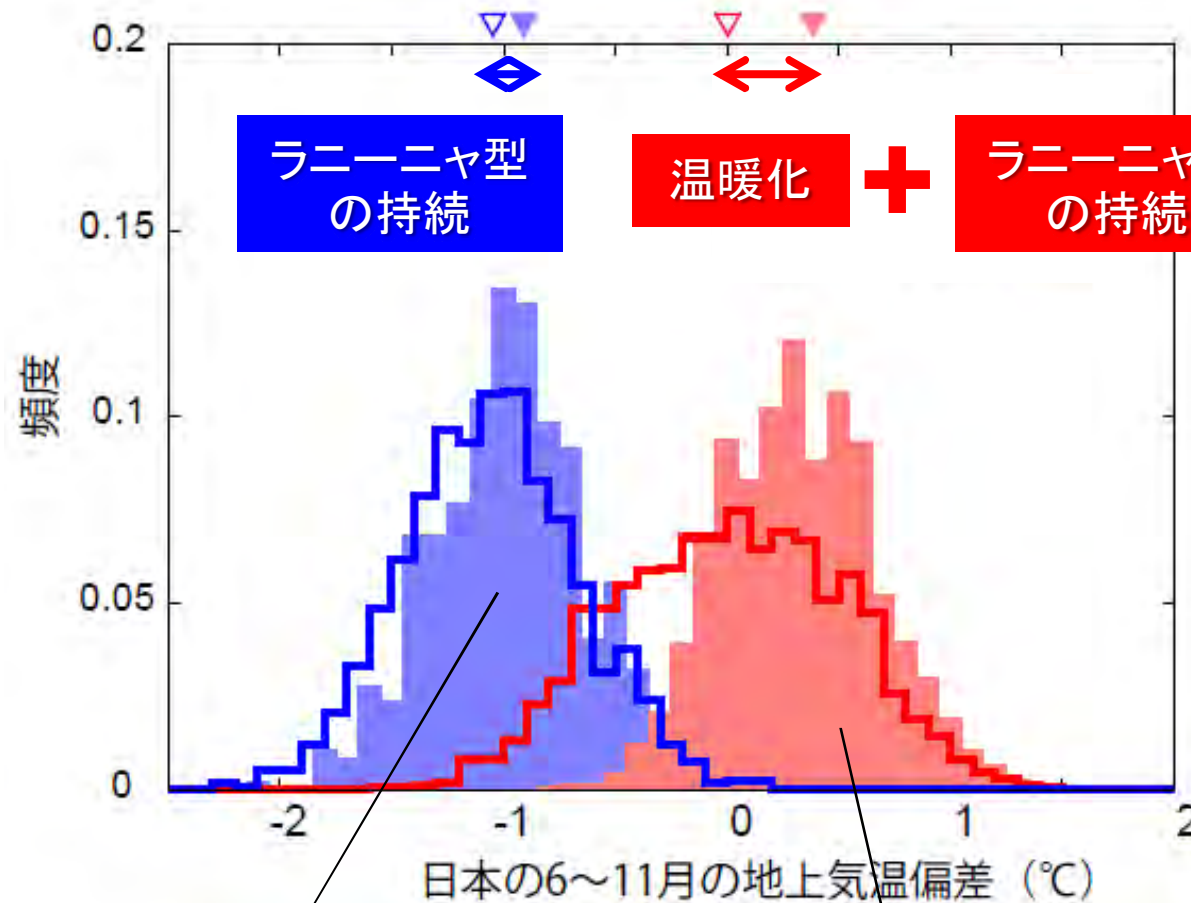


2000年代の世界と日本の気候

- 全球気温上昇の停滞（ハイエイタス）
- ラニーニャ型海面水温偏差（負のIPO）
- バレンツ・カラ海の海水減少
- 日本の夏は暑く、冬は寒い傾向＝季節の変化が大きい
⇒ なぜ？

日本の高温リスクに対する 温暖化と十年規模自然変動の寄与

d4PDFから得られた日本の地表気温偏差ヒストグラム



ポイント

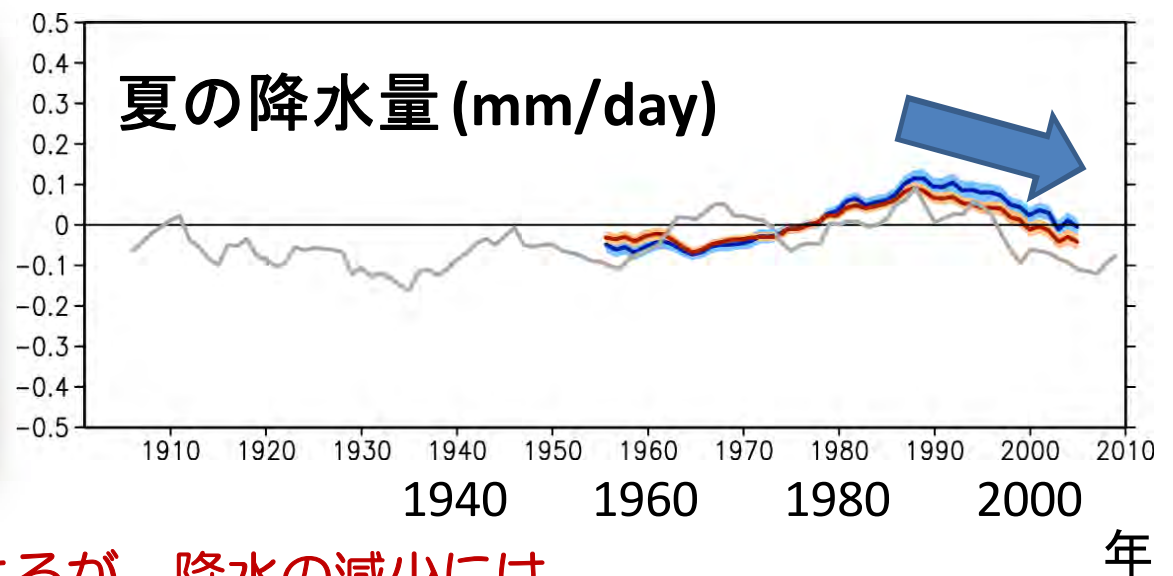
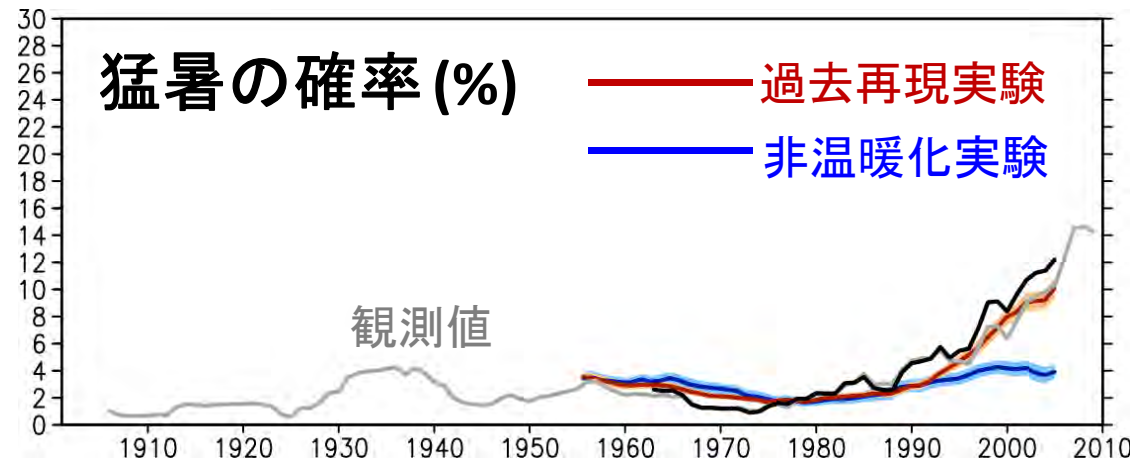
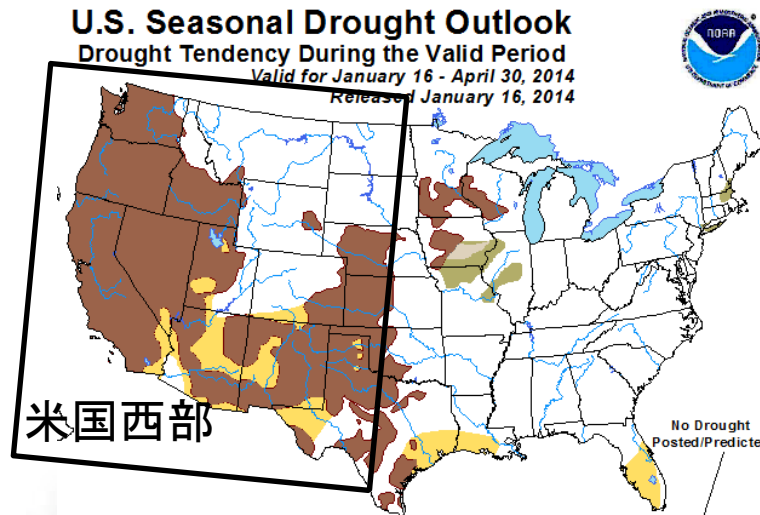
ラニーニャ型の十年規模
変動発生時には、日本の
夏がより暑くなる傾向

そこに温暖化が重なると
夏の高温リスクがより
高まる

ラニーニャ型の持続も夏の高温リスクの増加に寄与している

最近10年で夏～秋の
高温リスクが増加

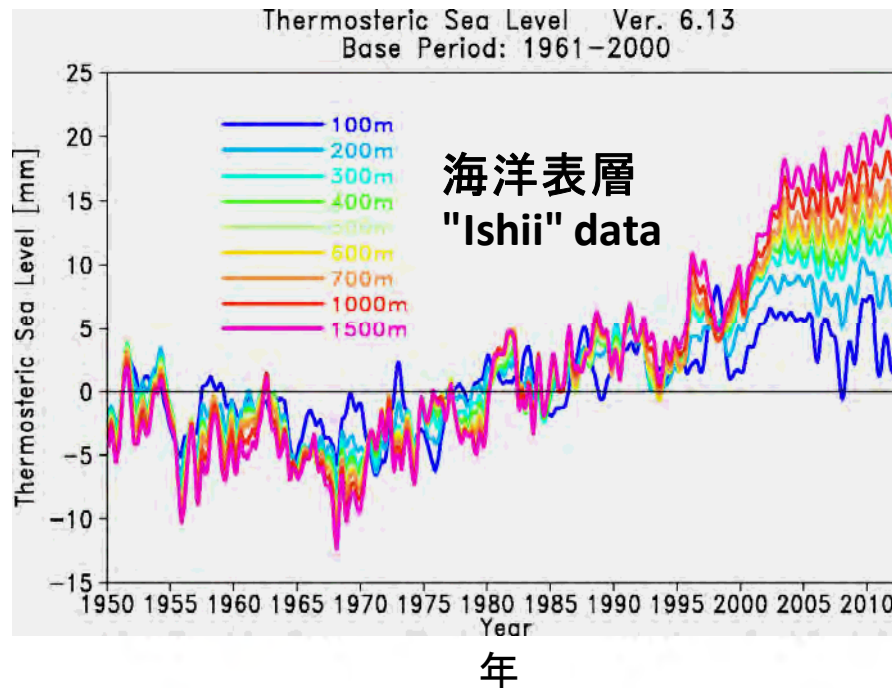
カリフォルニアの高温・干ばつリスクに対する温暖化と十年規模自然変動の寄与



猛暑の増加は温暖化によるが、降水の減少には
自然の十年規模気候変動が最も重要

地球温暖化の「停滞」(いわゆるハイエイタス)

- ❑ 2000年以降に温暖化傾向が鈍っている原因がわからなかった
- ❑ IPCC AR5以降に社会の関心が高まった
- ❑ 気候変動メカニズム、人為起源温暖化の議論が再燃



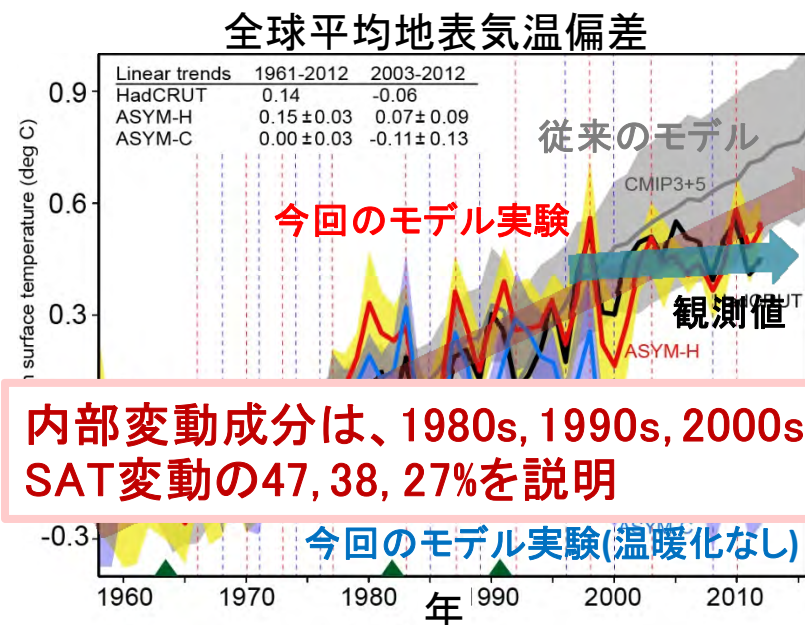
人為起源の温室効果ガス排出は21世紀に入っても増加し続けているが、気温は予想されるように上昇していない

外部強制に対する応答? (成層圏エアロゾル、太陽活動、火山噴火など)

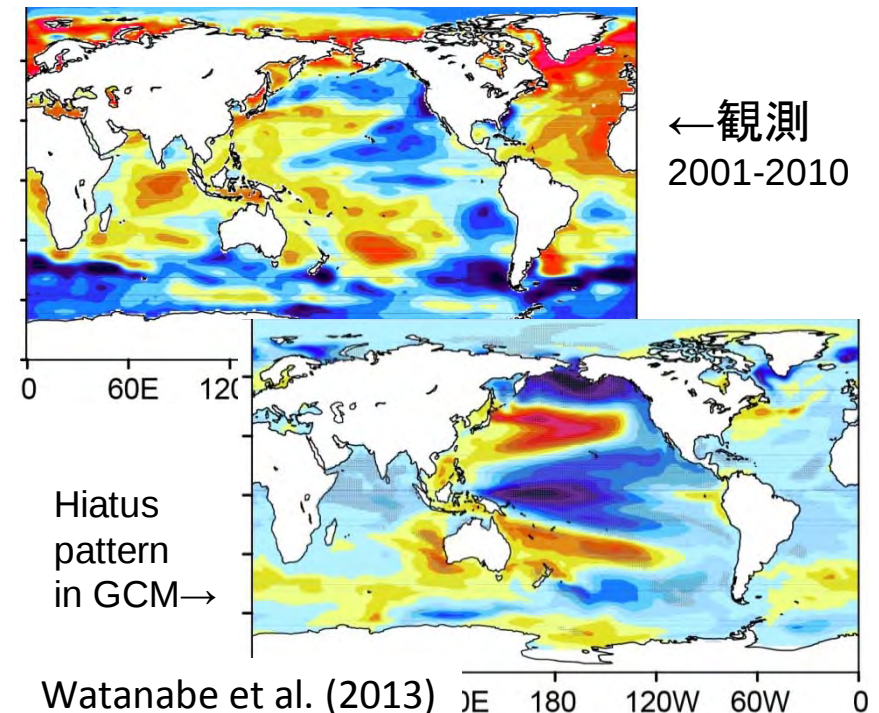
気候の内部変動? (負の太平洋数十年規模変動 (IPO))

地球温暖化の「停滞」(いわゆるハイエイタス)

- ❑ 2000年以降に温暖化傾向が鈍っている原因がわからなかった
 - ❑ IPCC AR5以降に社会の関心が高まった
 - ❑ 気候変動メカニズム、人為起源温暖化の議論が再燃
- ✓ 気候モデルでハイエイタスを再現
 - ✓ 気候の内部変動(太平洋数十年変動、IPO)がハイエイタスの主要因と特定
 - ✓ 現在は温暖化停滞期から加速期への転換期？



Watanabe et al. (2014 Nature CC)



ハイエイタスに対する大西洋/インド洋の影響

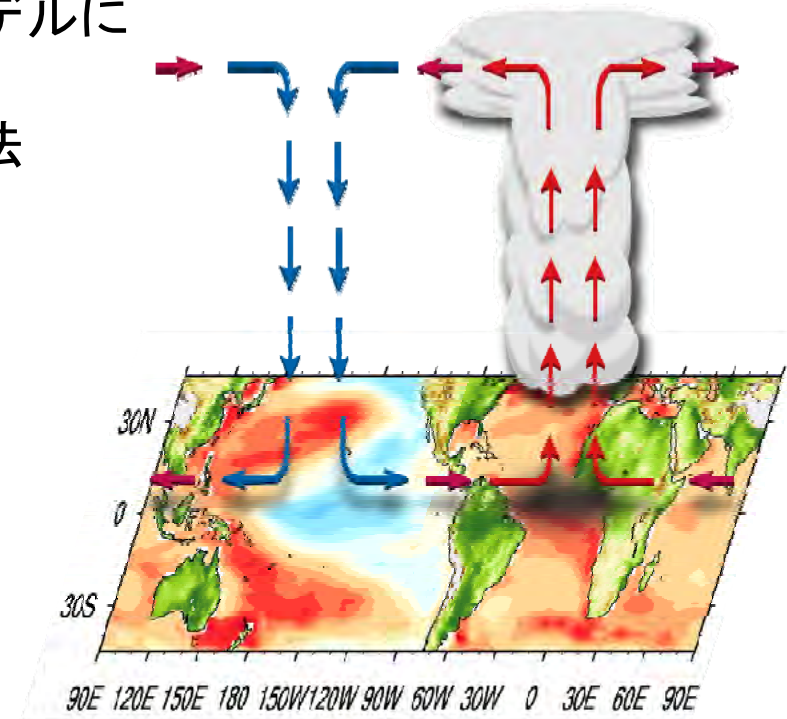
□ 気候モデルを用いた「ペースメーカー実験」

部分的に観測データを大気海洋結合モデルに
同化したシミュレーション
⇒気候変動メカニズム探求の有効な手法

□ 熱帯大西洋の海面水温上昇

⇒ウォーカー循環の強化と熱帯中東部
太平洋の海面水温低下

□ インド洋の昇温も同様に太平洋 海面水温低下に寄与

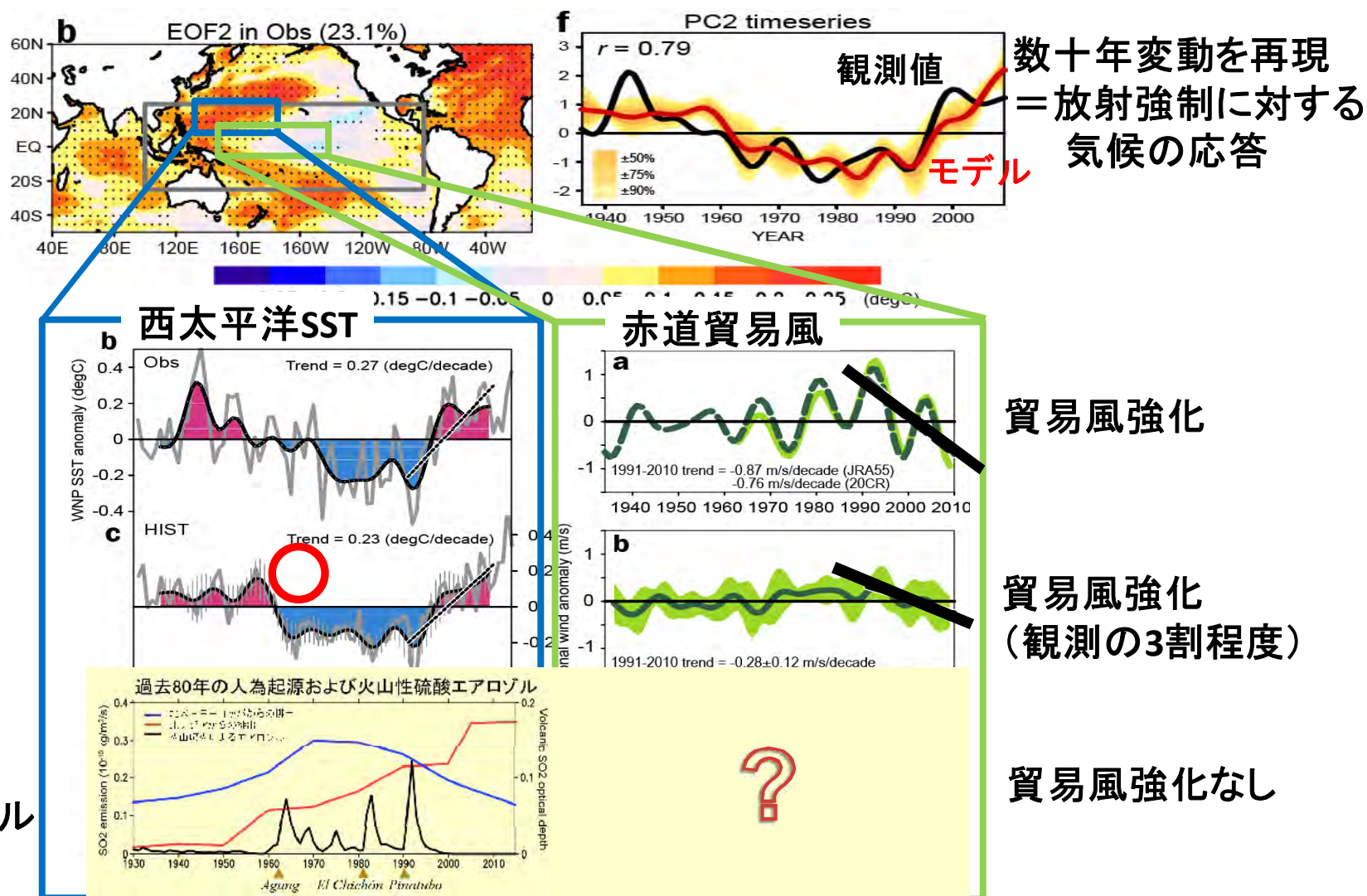


Chikamoto et al. (2015)

どちらも負のIPO (⇒ハイエイタス) にとって
決定的ではないが無視できない影響を及ぼす

赤道貿易風の強化とエアロゾル

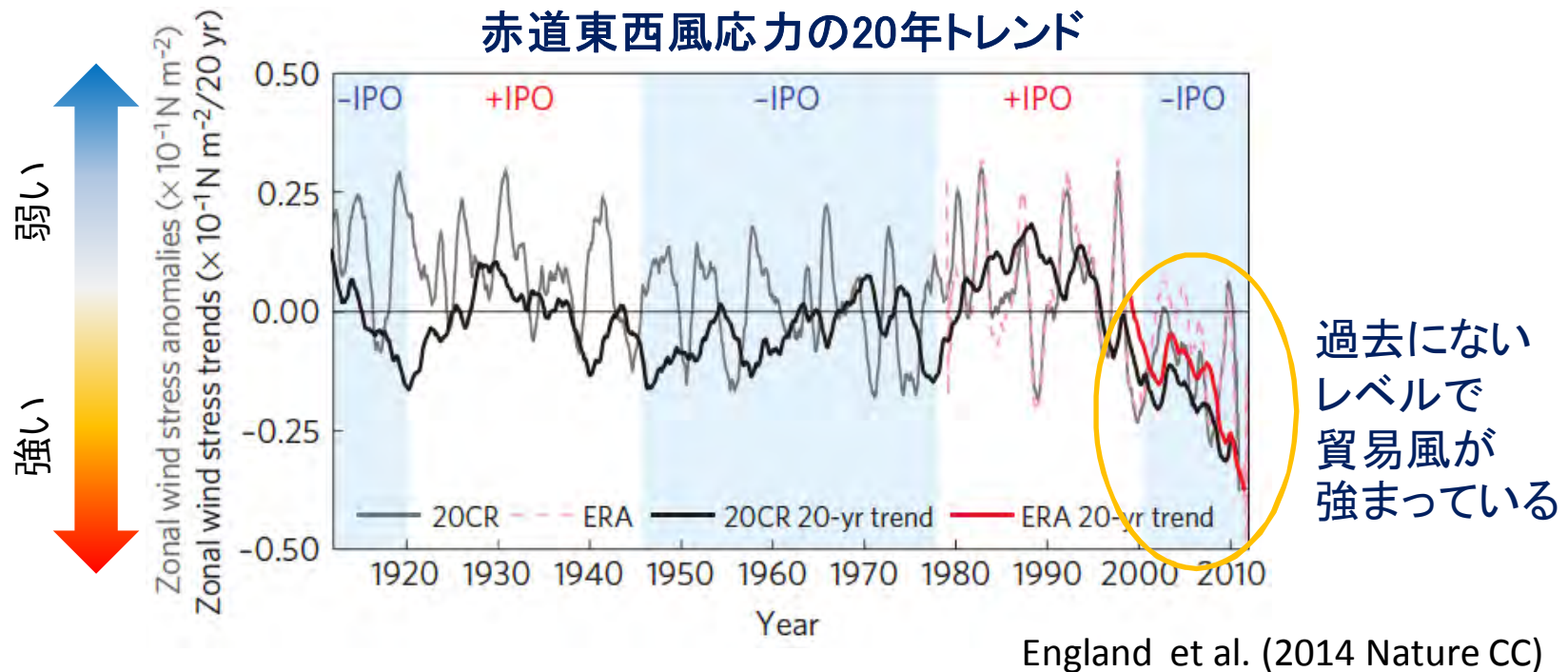
IPOとは別の数十年規模変動(TBV、2000年代西太平洋で水温上昇)



Takahashi & Watanabe (2016 Nature CC)

ハイエイタスには寄与しないが、近年の貿易風強化は部分的にエアロゾルによる

近年の太平洋貿易風の強化は謎

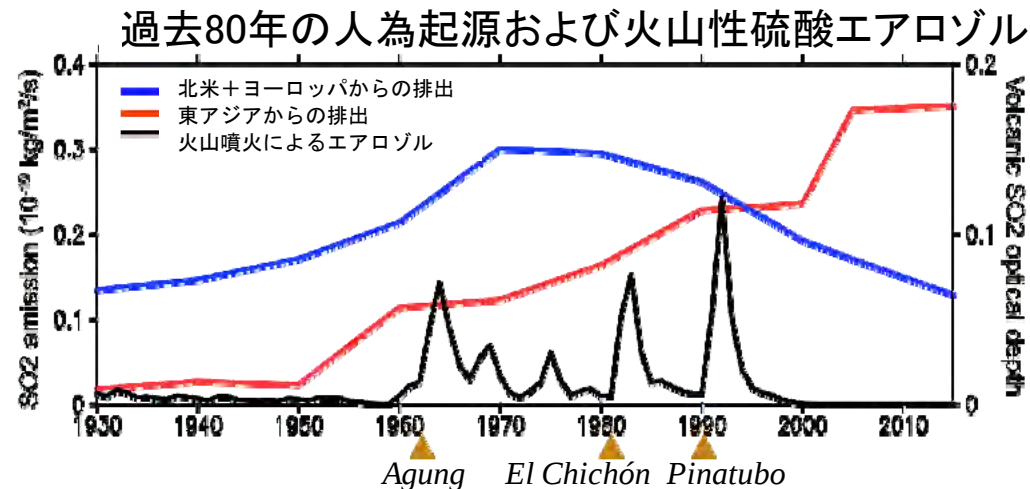


記録的な貿易風の強化はIPOだけでは説明できないかもしれない

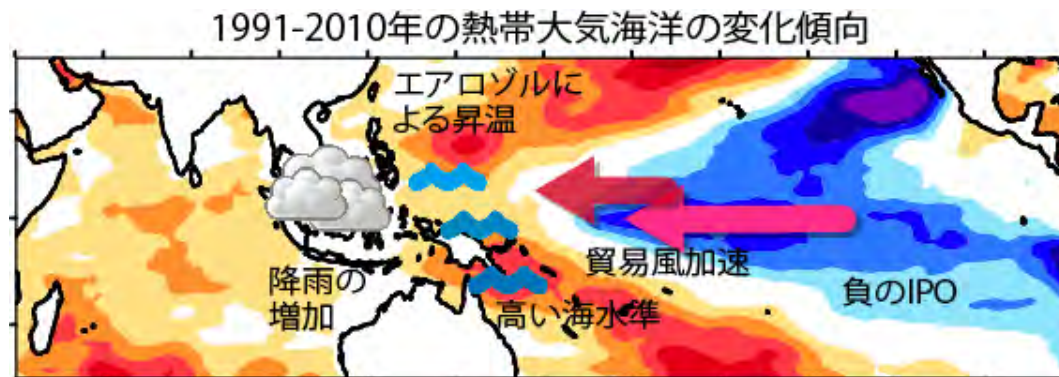
外部強制？ { ☐ 温室効果ガス → unlikely
☐ エアロゾル → may be

気候モデルを用いたメカニズム実験

- 1921～2014年の気候再現実験 ⇒ 近年の貿易風強化をある程度再現
- 硫酸性エアロゾルのみを産業革命前に固定 ⇒ 貿易風強化せず

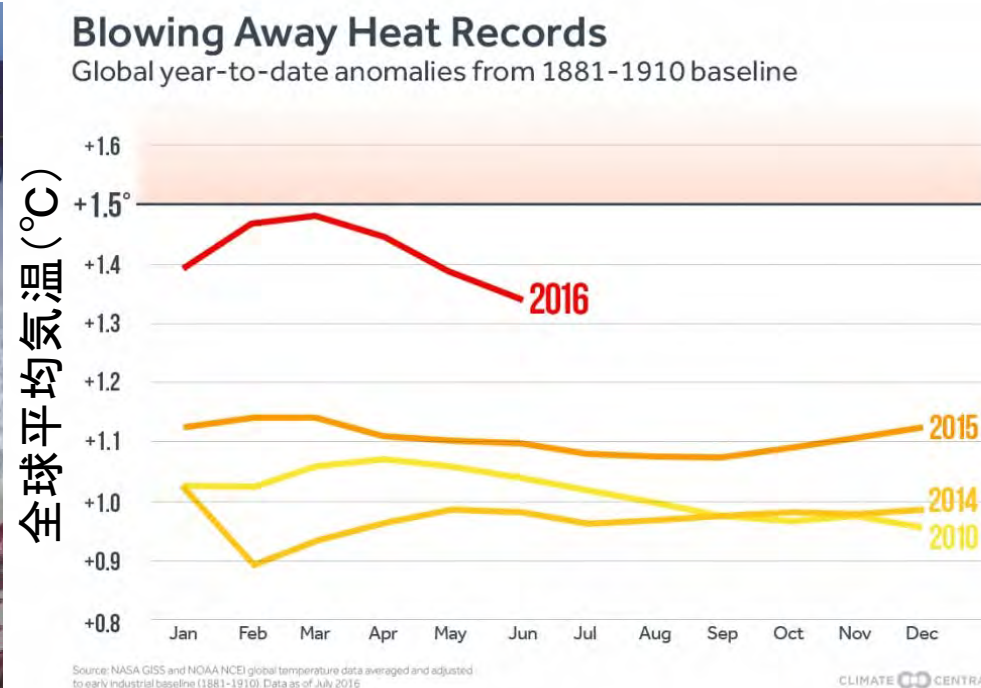


- エアロゾルの放射強制
→ 観測された貿易風強化の約1/3を説明
- 負のIPOとはほぼ独立
(ハイエイトスには寄与せず)
だが、西太平洋の降水や海面水位の変化によって重要であることが判明



最近の気候

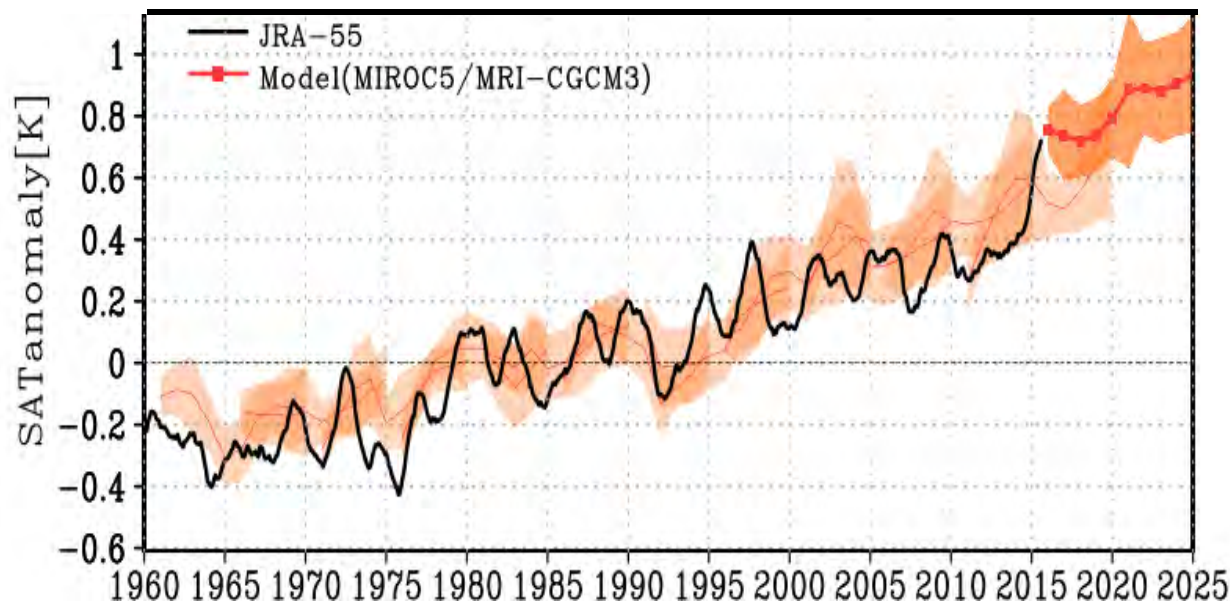
- 2015エルニーニョ
- 全球気温上昇 $+1^{\circ}\text{C}$ 超（産業革命前を基準に）
- IPO符号反転、ついにハイエイタス終了か？



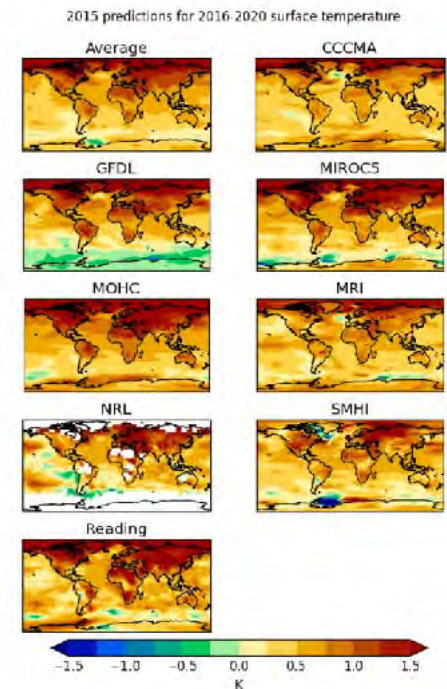


最近の気候

- 2015エルニーニョ
- 全球気温上昇 $+1^{\circ}\text{C}$ 超（産業革命前を基準に）
- IPO符号反転、ついにハイエイタス終了か？



**MIROC+MRI-CGCM
による予測**



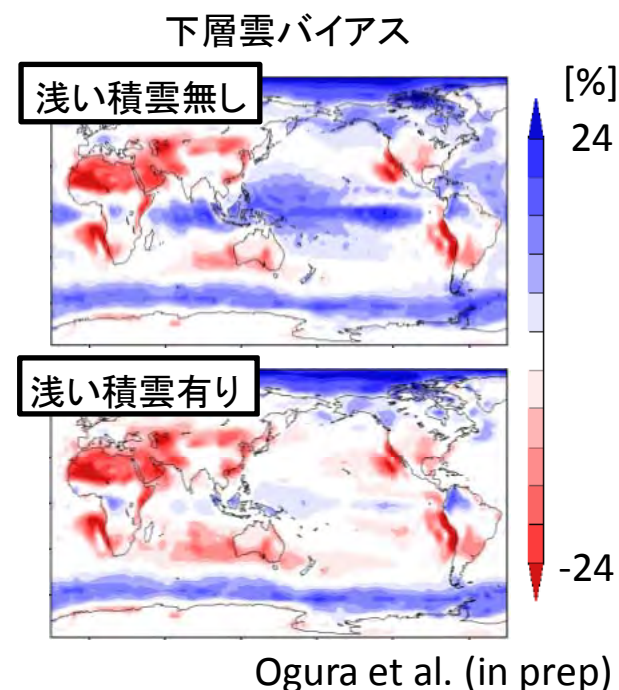
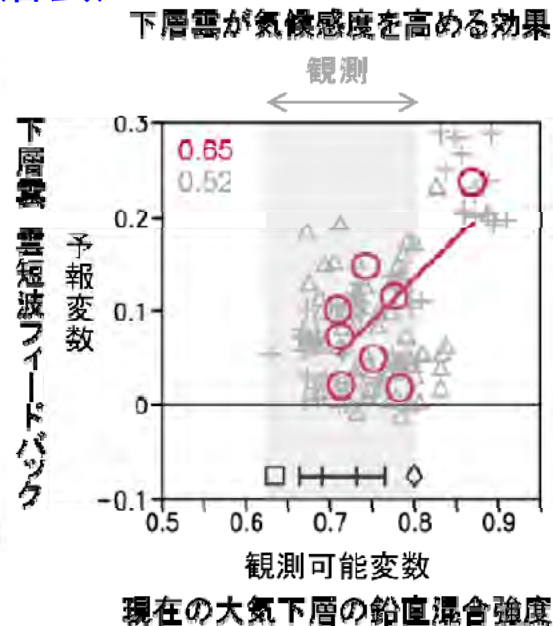
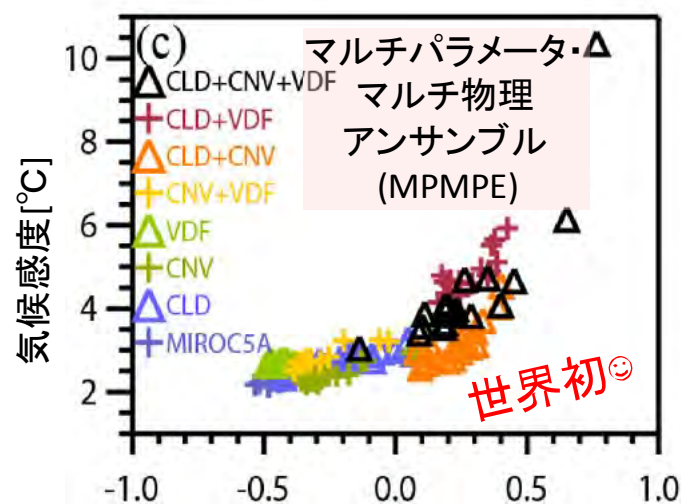
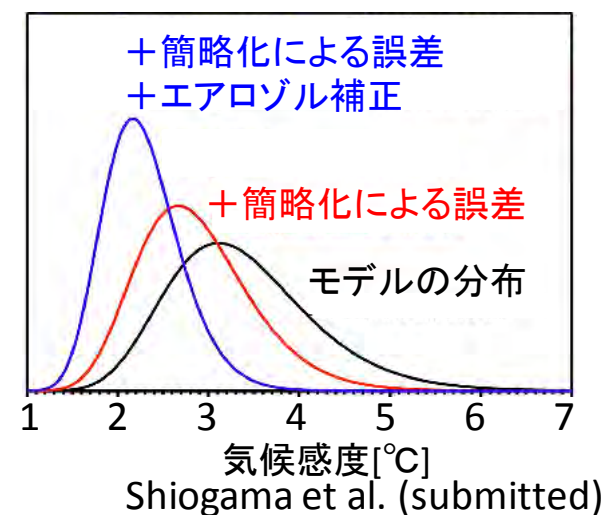
気候感度問題

□ 1.5~4.5°Cの不確実性幅 (IPCC AR5)

□ 温室効果ガスの削減コストに関係

□ 不確実性の低減へ向けた取り組み

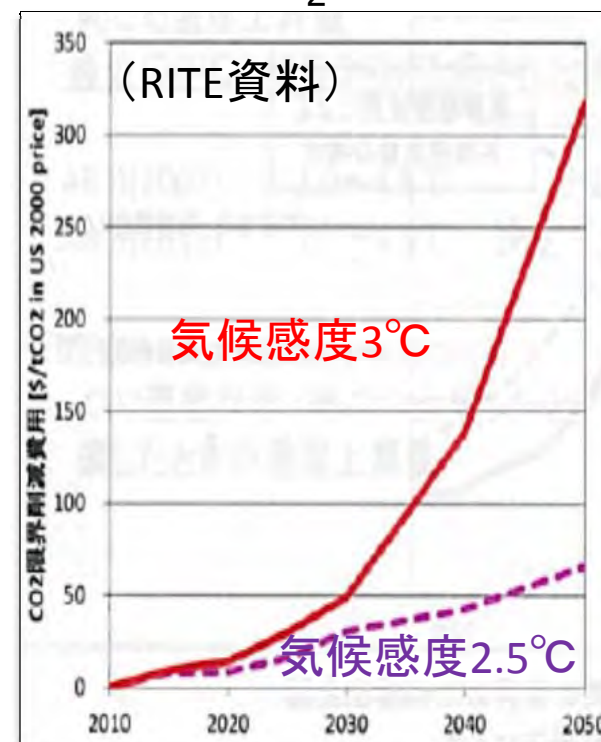
- ✓ エネルギー収支法の再検討 → 2.0~4.5°Cを示唆
- ✓ アンサンブル実験と観測による不確実性幅の制約
- ✓ 気候モデルの改良(下層雲)



気候感度

- CO₂濃度が2倍になった場合、最終的に世界平均気温が何°C上昇するかを示す指標。
- 1.5°C～4.5°C (IPCC第5次報告書, 2013)
- 下限と上限で3倍も違う！
- 温室効果ガスの削減コストに関係
- 気候変動に関する難問の一つ

気温上昇を2°C以下に抑える場合のCO₂削減費用

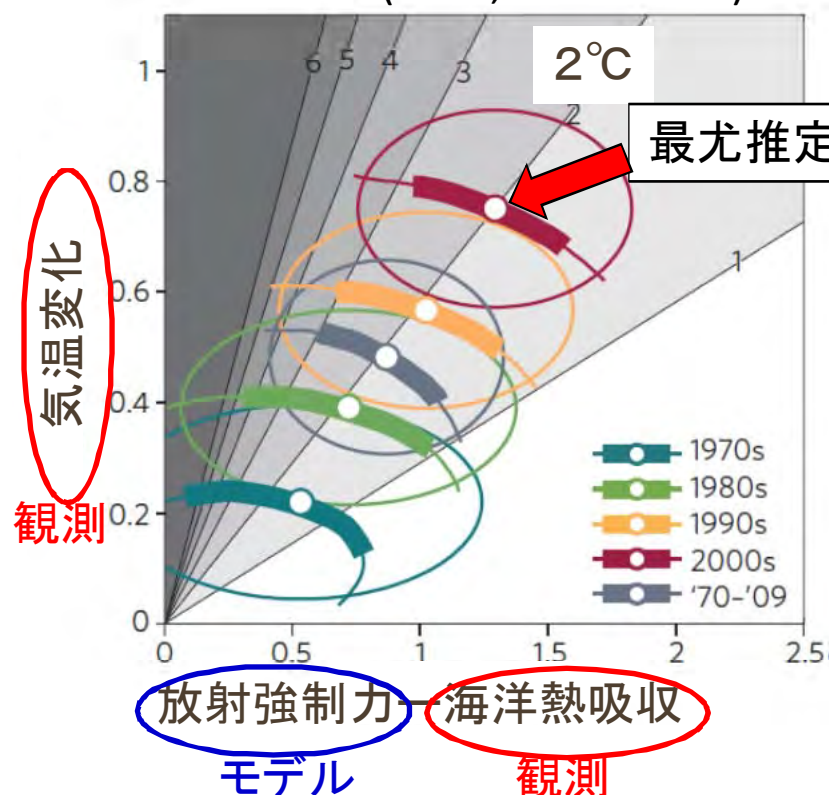


IPCC(2013)で気候感度の不確実性幅が広がった (より分からなくなった)

IPCC (2007) $2^{\circ}\text{C} \sim 4.5^{\circ}\text{C}$ (最尤推定値は 3°C)

IPCC (2013) $1.5^{\circ}\text{C} \sim 4.5^{\circ}\text{C}$ (最尤推定値はなし)

Otto et al. (2013, NatureGeo)



気候システムのエネルギー収支式

海洋熱吸収 = 放射強制力 + フィードバック × 気温変化

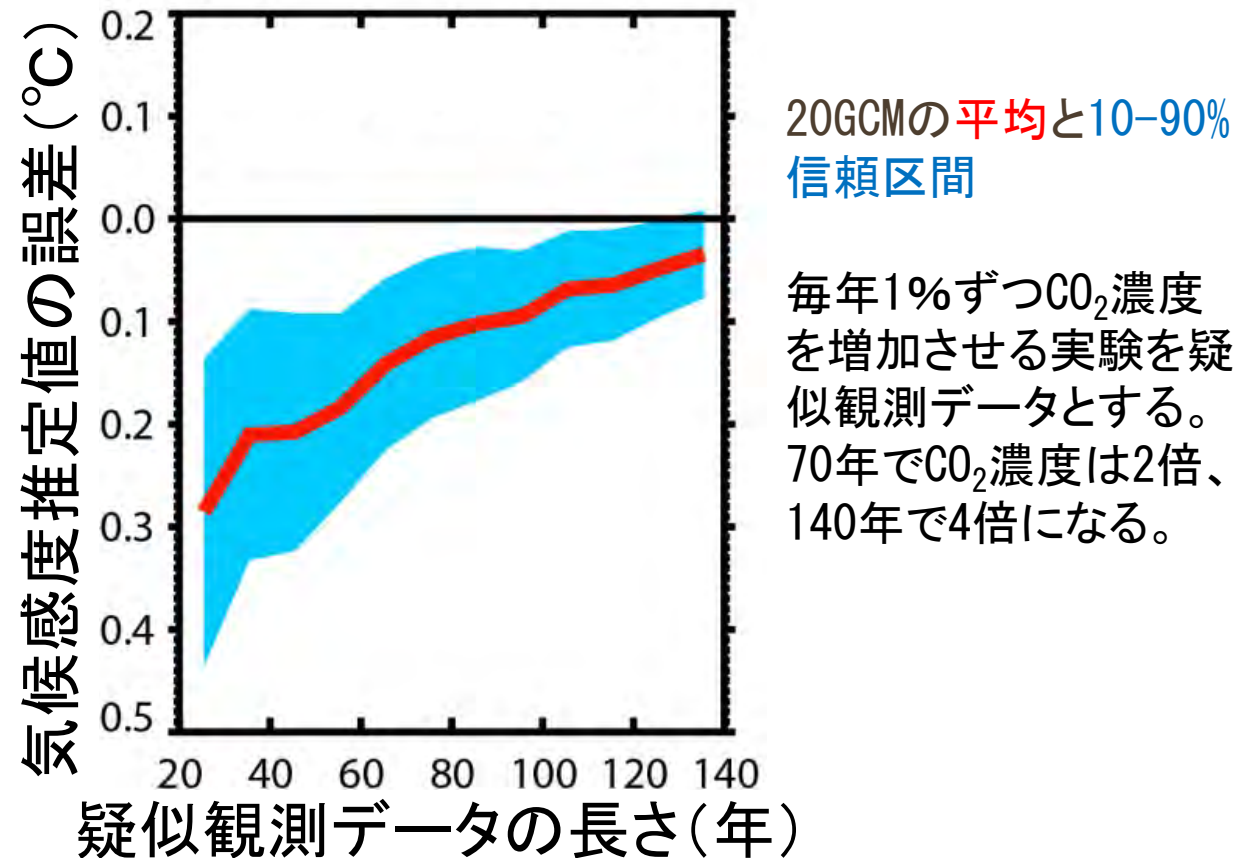
気候システムの簡単なエネルギー収支式に、「地上気温と海洋熱吸収の観測データ」と「放射強制力のモデル推計値」を当てはめて気候感度を推定する研究(エネルギー収支法)が低い気候感度を示すため。

気候モデルの平均値は、 3.1°C

エネルギー収支法は、 2°C

エネルギー収支法は、そもそも正しいのか？

気候感度が分かっている気候モデルの温暖化実験データを「疑似観測データ」として、エネルギー収支法に当てはめれば、「そのモデルの正しい気候感度」が推定できるはずだが...

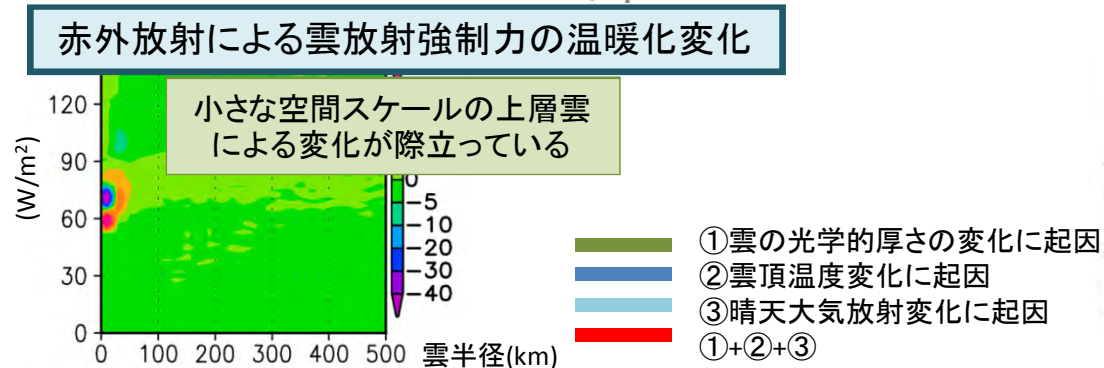
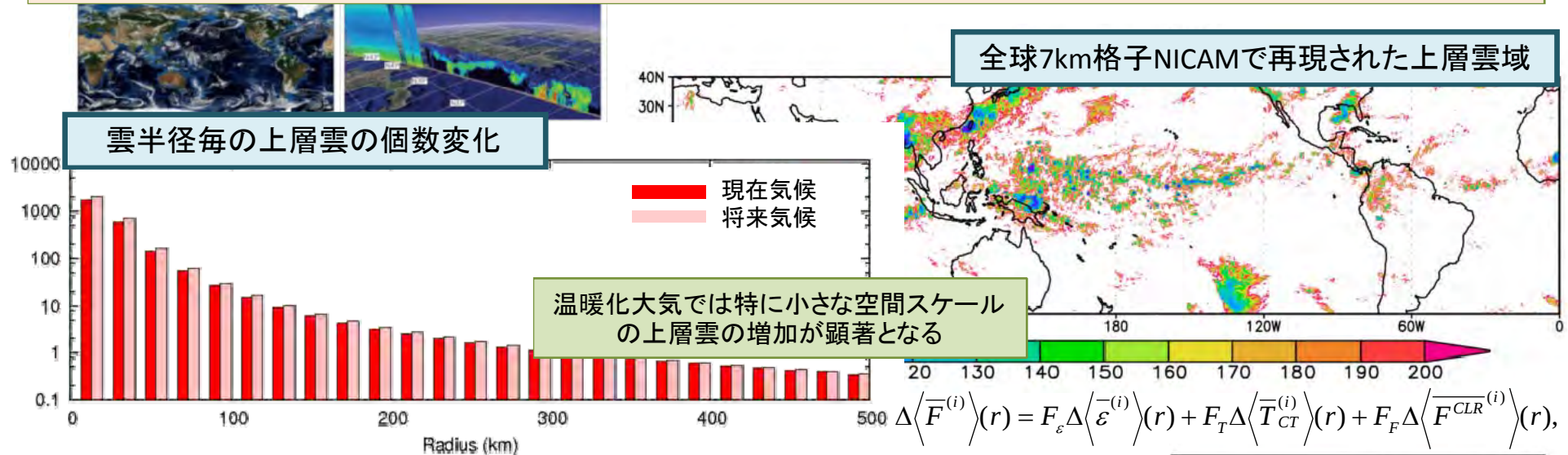


- 温暖化シグナルが小さい時は、気候感度を系統的に過小評価する。
- エネルギー収支法は「気候感度の推定値は観測期間によらず一定」と仮定。
→この仮定は単純すぎて不適切。

テーマAサブ課題b成果

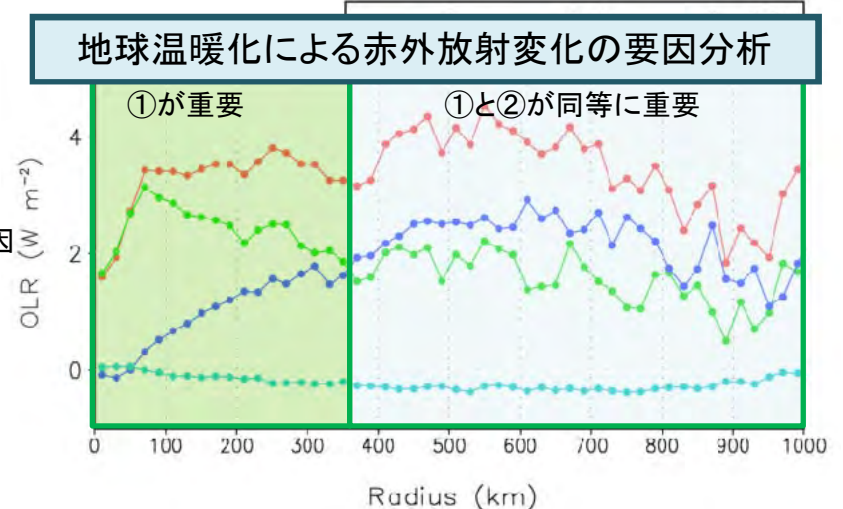
全球非静力学モデルNICAMを用いた上層雲の温暖化応答研究

多様な空間スケールの雲を陽に計算できる全球で高分解能数値シミュレーションが温暖化研究に有効な手段となる



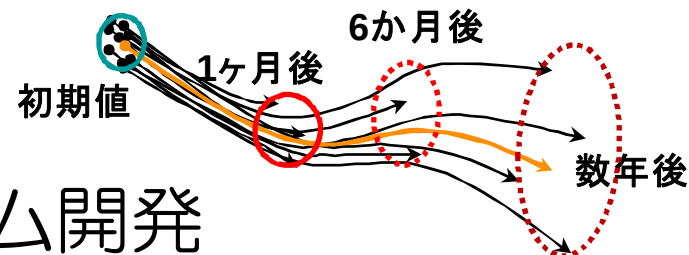
主著論文成果

- Noda et al. 2016, Geophys. Res. Lett. doi:10.1002/2016GL067742
- Noda et al. 2015, J. Meteor. Soc. Japan, 93, 181-197
- Noda and Satoh 2014, Geophys. Res. Lett., 41, doi:10.1002/2014GL061812
- Noda et al. 2014, J. Climate, 27, 7753-7768
- Noda et al. 2014, SOLA, 10, 34-38
- Noda et al. 2013, J. Meteor. Soc. Japan, 91, 727-746



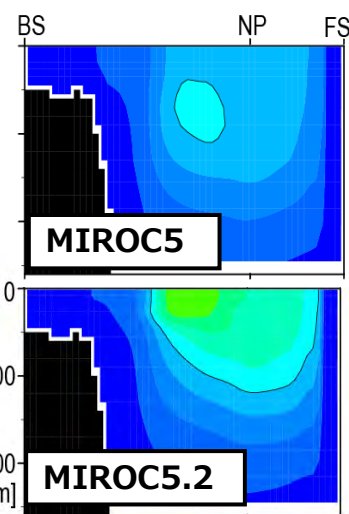
赤外放射変化の主な要因は雲の大きさにも大きく依存する

シームレス気候変動予測実験

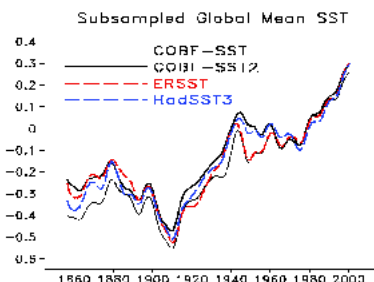
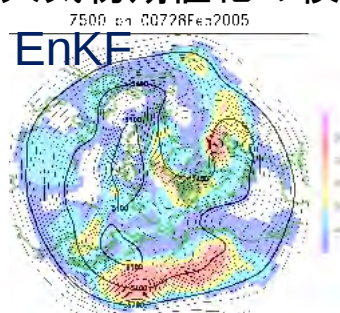


予測のためのモデル・システム開発

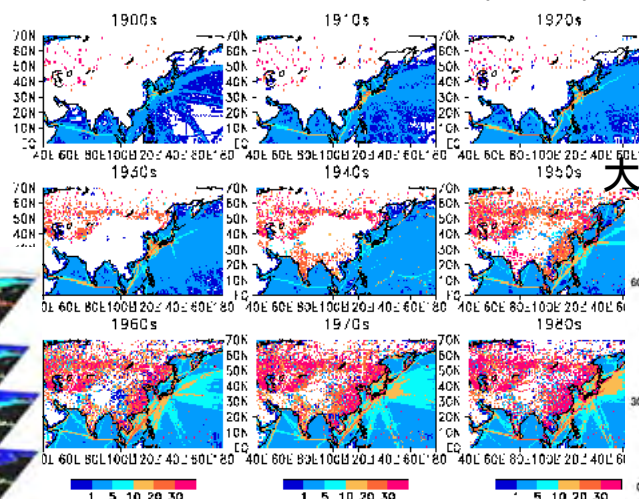
- CMIP6に向けた気候モデルの改良と調整
- EnKFを用いたシームレス気候予測システム
- 大気海洋 **150年**再解析: 気候研究のための長期データ作成



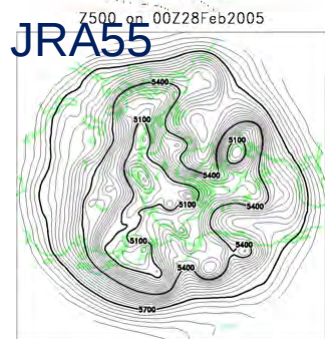
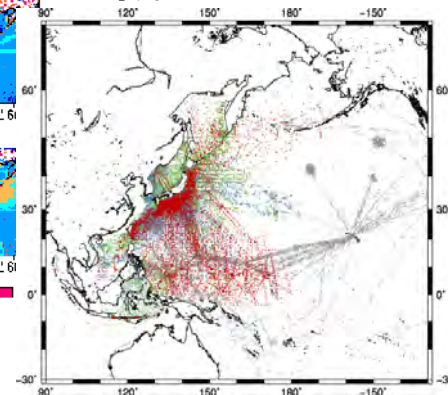
大気初期値化の検証 海面水温解析(COBE-SST2)



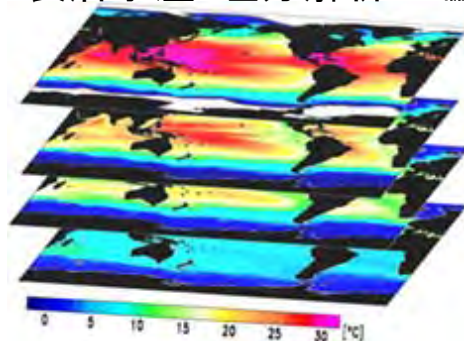
歴史的海面気圧データ (ISPD)



大気・海洋データレスキュー



表層水温・塩分解析



IPCC第6次報告書へ向けた, 気候モデルMIROC6の開発

旧モデルからの主な更新部分

大気モデル

- ・ 浅い対流
- ・ 成層圏循環の解像, 中層大気用物理スキーム
- ・ 海洋起源及び二次有機エアロゾル

海洋モデル

- ・ 水平及び鉛直高分解能化
- ・ 海氷下での乱流エネルギーの扱いを精緻化

陸面モデル

- ・ subgridスケールでの積雪被覆率を診断
- ・ 融雪に伴う湿地帯を表現

- ✓ 気候モデルの系統的誤差軽減
- ✓ ENSO, IPOなど内部変動の再現性向上

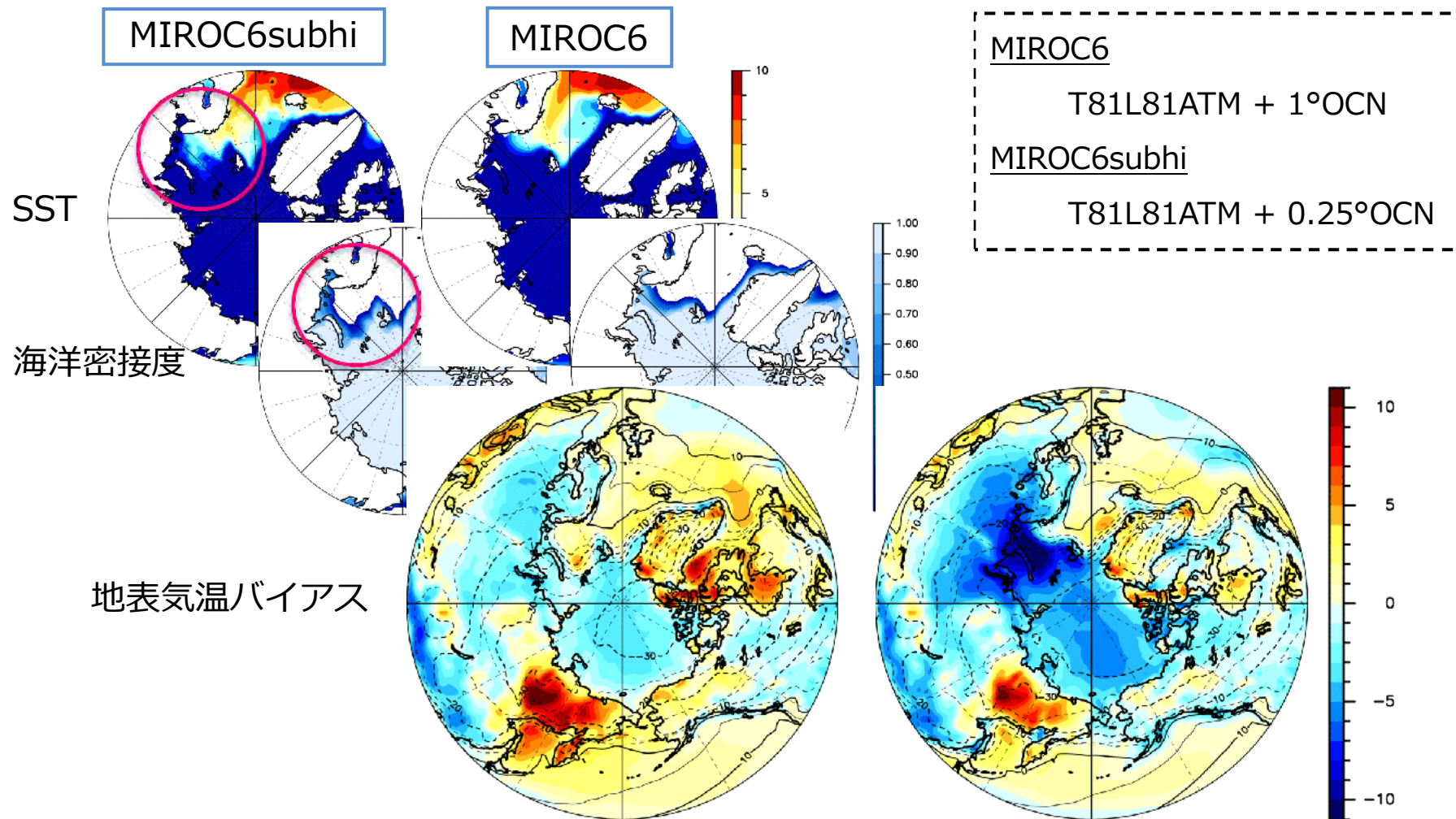
→ 気候変動予測時の不確実性低減

亜熱帯海上の浅い対流に伴う雲 (Bony et al. 2015)



(ARISE Infrastructure Project)

海洋モデルの高分解能化：極域への熱輸送と冬季気候

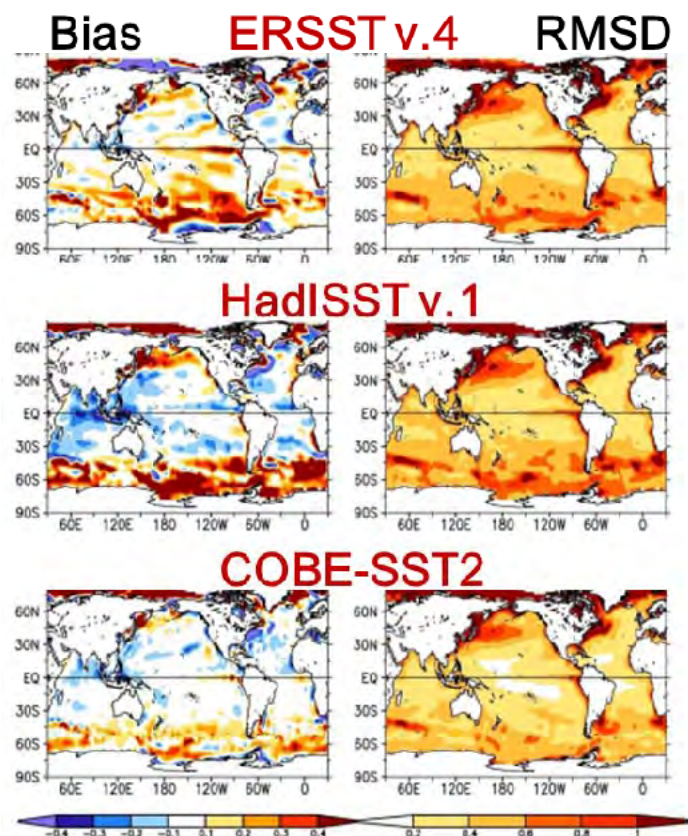


- ✓ 大西洋から北極海への暖水輸送と海氷融解 (特にバレンツ海)
- ✓ ユーラシア及び北極海上の冬季気温バイアスの顕著な改善

気候予測のための観測データの整備

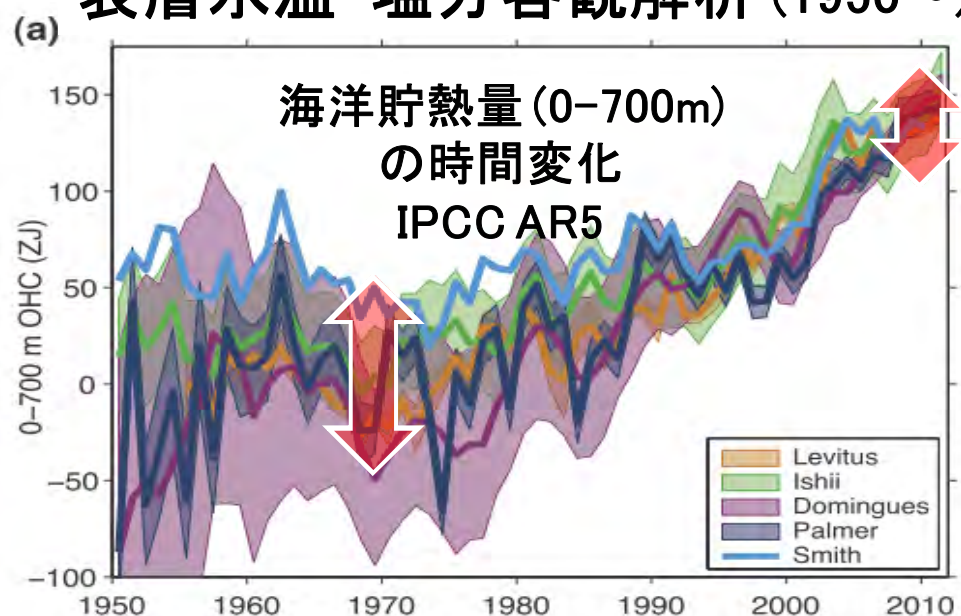
予測モデルの初期値化に活用し、IPCC 次回報告書に貢献する。

海面水温客観解析 (1850～)



推定精度を向上させ観測不確実性を評価した。(Hirahara et al. 2014)

表層水温・塩分客観解析 (1950～)



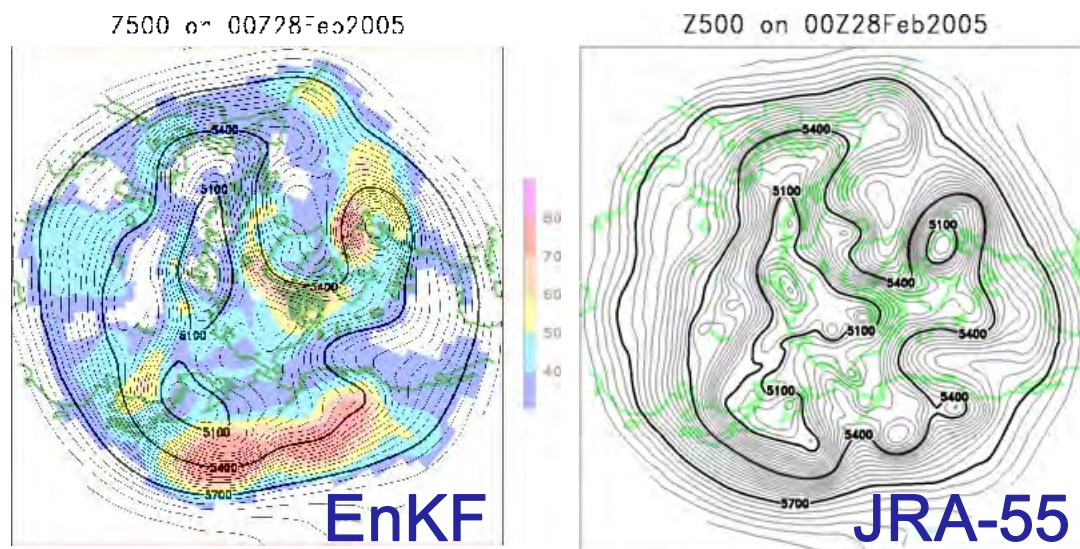
トレンド推定誤差の軽減と時空間変動の再現性向上のために解析手法を高度化 (Ishii and Fukuda. 2016 準備中)

- 観測データの信頼性を高める国際共同研究を実施
- 地表面気圧と陸上気温の解析も整備中、論文も。
- いずれも気象庁の現業で利用されている。

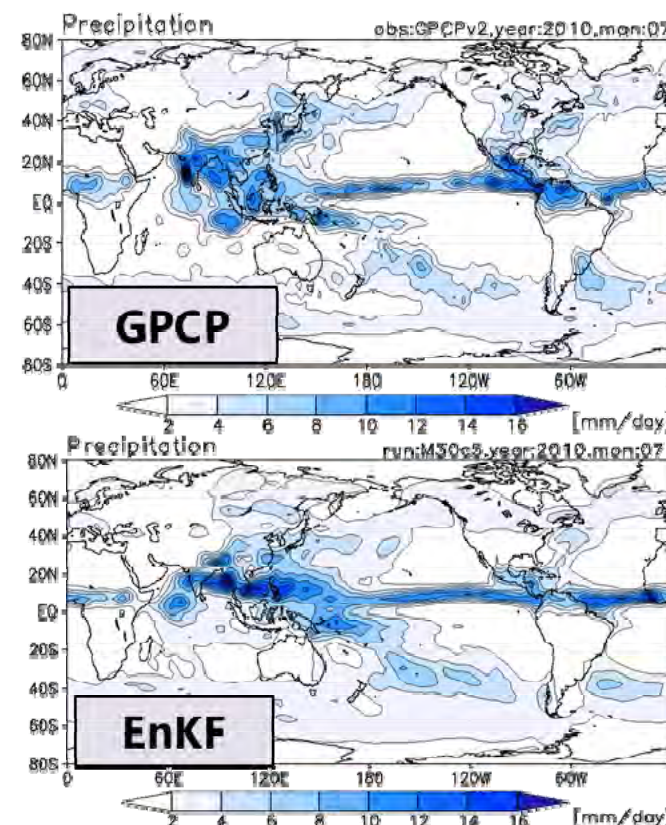
気候モデル初期値化手法の高度化

アンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) の開発と導入

- ✓ モデル物理と整合性の高いデータ同化出力
- ✓ 予測モデルの初期値を同時に作成
- ✓ 季節から数年規模の気候予測実験が可能

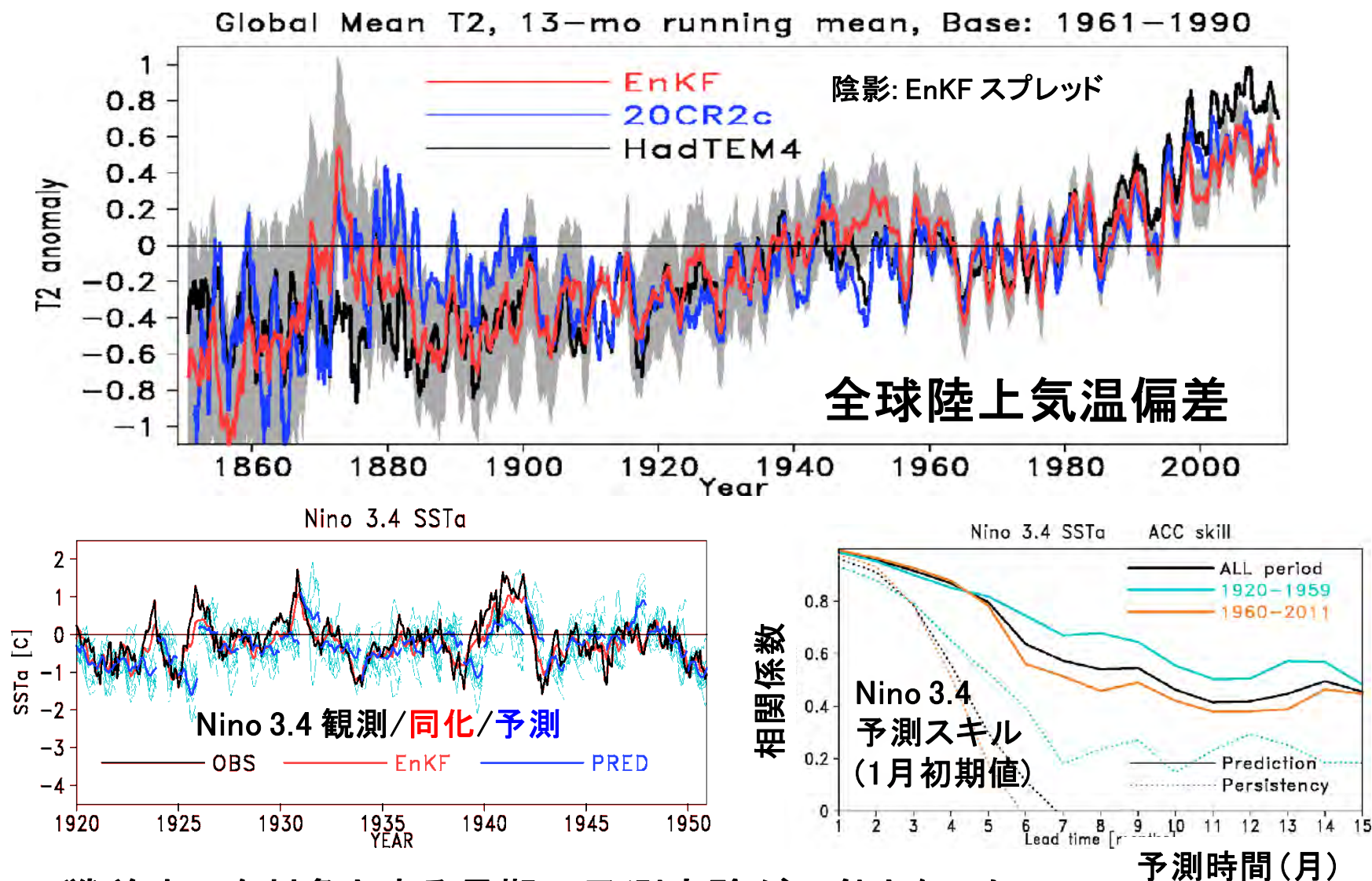


とある時刻の 500hPa 高度場とスプレッド(左)と再解析(右)比較、EnKF では地上気圧と海面水温データのみで再現。右は月平均降水の比較。



➔ CMIP6 十年規模予測実験に適用可能

EnKF の応用 150年気候再解析



戦前までを対象とする長期の予測実験が可能となった！

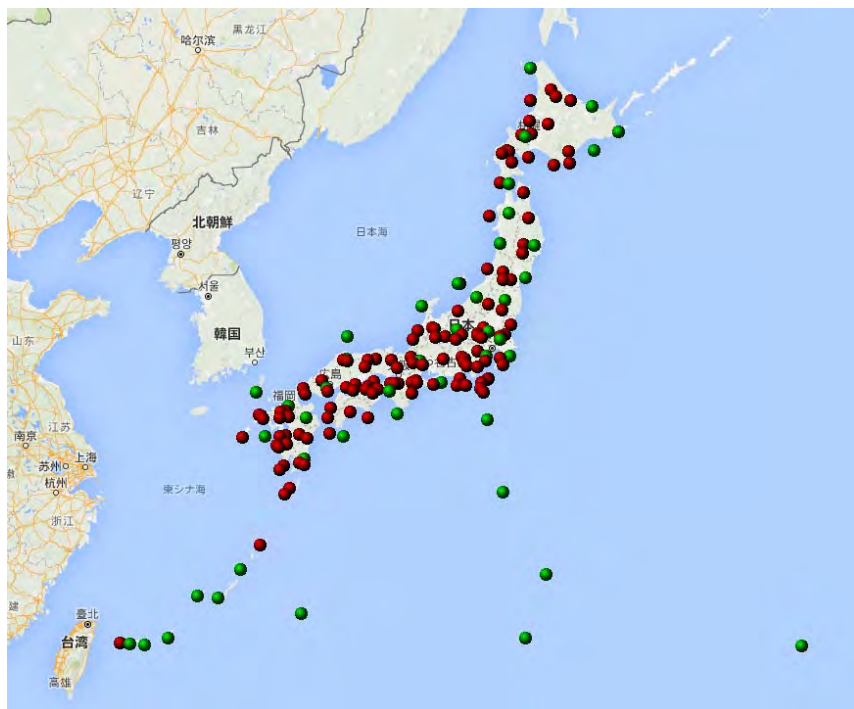
➔ 気候モデルの高度化、予測スキルの向上へ

(Ishii et al. 2016 準備中)

プログラム間連携予算

気象・海洋の歴史的観測データのデジタル化

150年気候再解析に使用する大気・海洋の歴史的観測データをデジタル化し、とりわけ戦前の気候変動の再現精度の向上を図り、創生各課題間連携で気候再解析データを活用した研究の展開を目的とする。



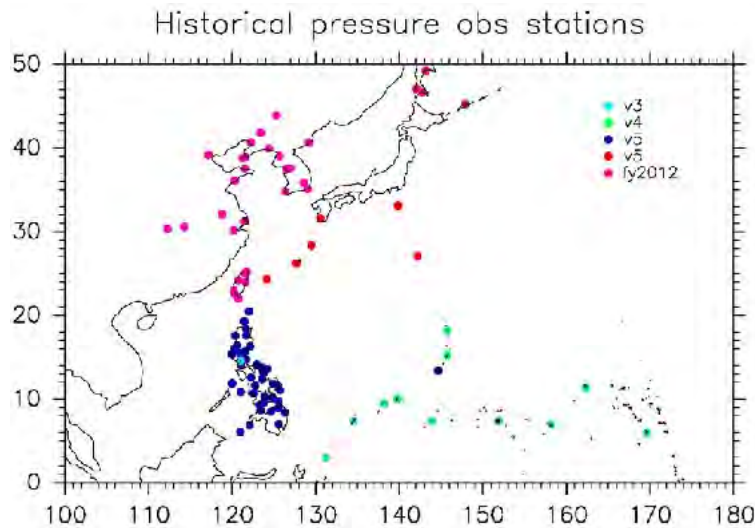
電子化作業

- 1) 気象庁所有の9官署分の観測開始から1960年までの毎時地上気圧観測データ
- 2) 気象庁と日本海軍が実施した高層データ

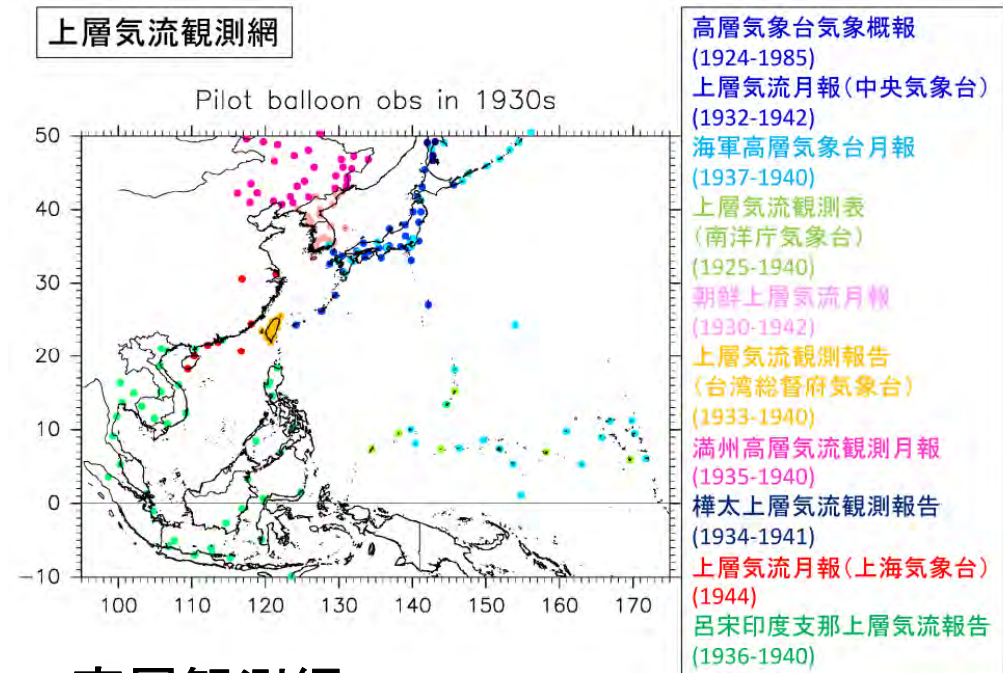
様々な問題の克服

- 1) 電子化コストの最小化
電子化手順の明確化
業者の教育
- 2) 電子化を阻害する問題
データ記載不鮮明
データ書式不統一
- 3) 観測メタ情報の収集

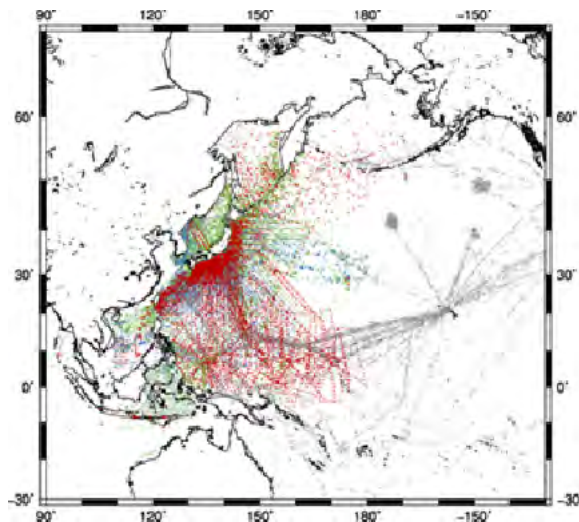
気象・海洋の歴史的観測データのデジタル化



デジタル化した海面気圧データ
(1890 – 1940; Kubota et al. JAMSTEC)



高層観測網(1920's-1940's)



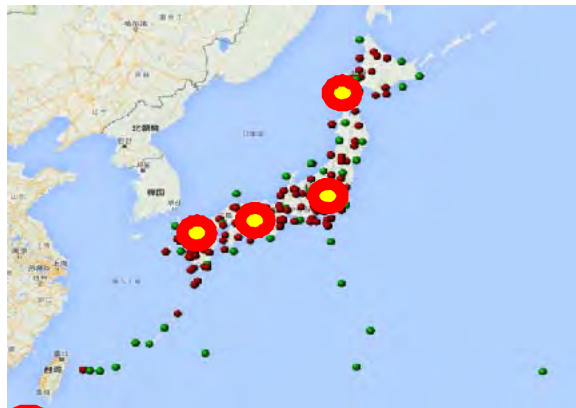
← Expected data distribution (red) of marine met. Obs. by the Japanese Imperial Navy (1903-1944, ~ 1 million)

Participating in and collaborating with international activities: ACRE, ICOADS, ICA&D, IQuOD

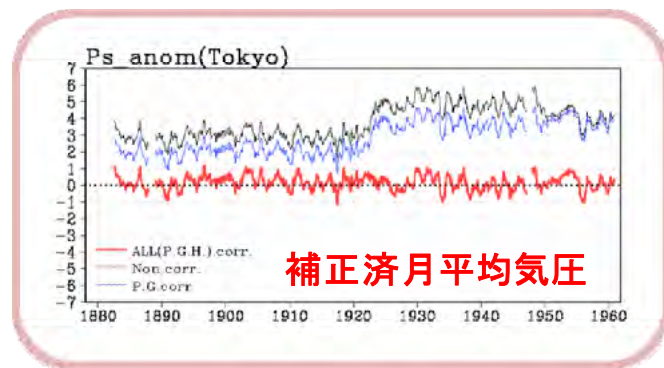
150年気候再解析での 日本域気温と降水の再現

観測と数年から10年規模の時間スケールで対応、ただしほとんどの日本域の観測データは未電子化のため、再解析で使用されていない。

電子化したデータを追加して再実験

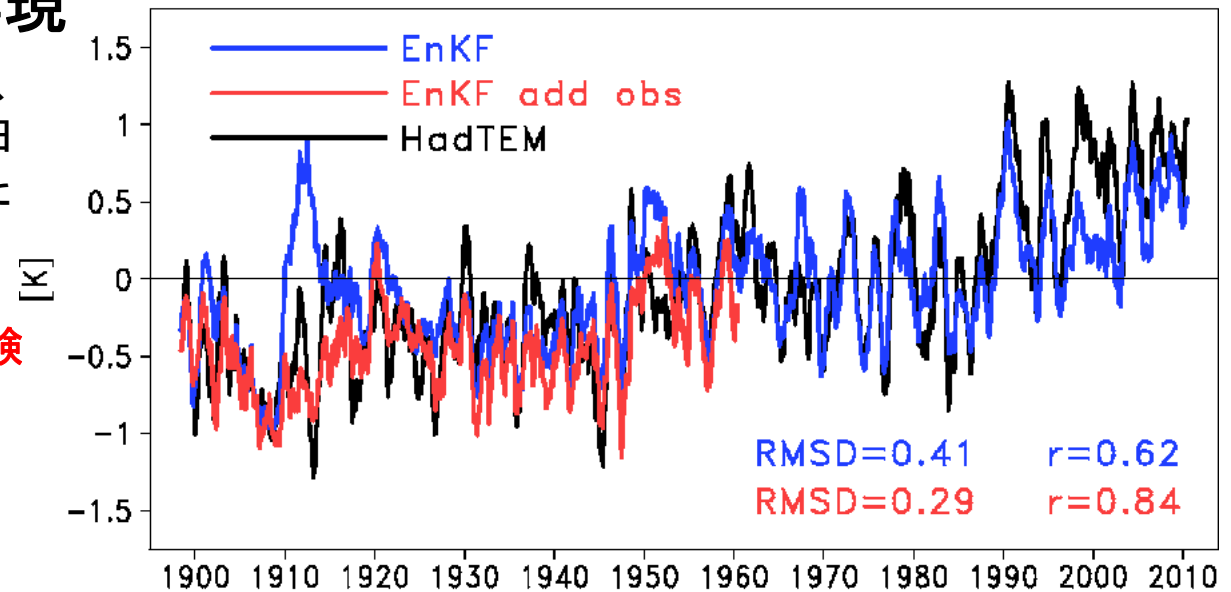


● 函館、東京、神戸、福岡

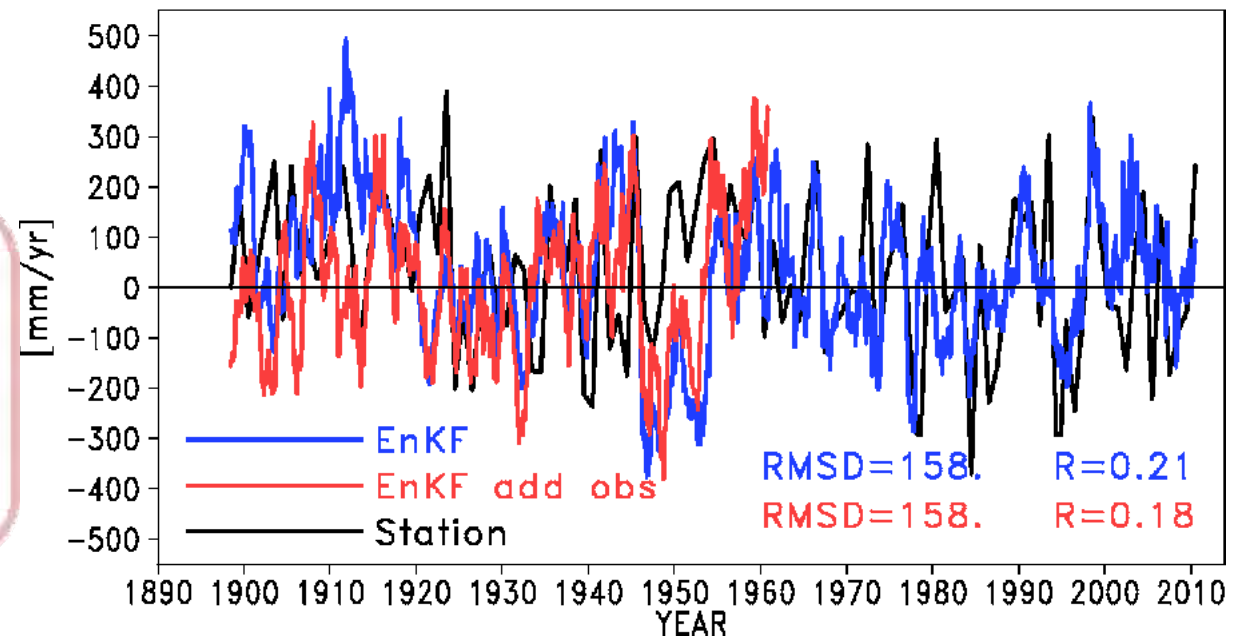


東京での観測

日本域で平均した地上気温時系列



日本域で平均した年降水量時系列



まとめと今後

全球規模の気候変動のメカニズム、要因分析、予測などの研究データは、温暖化に関わる基盤情報である

《国内の影響評価・適応緩和コミュニティに対して》

- ✓ より**詳細な**温暖化予測・気候変動要因分析
全球高解像度、領域ダウンスケール、etc
- ✓ より**確実な**温暖化予測・気候変動要因分析
モデル改良、大アンサンブル、結合長期再解析、etc
- ✓ 今後5～10年で発生する新たな課題に**迅速に対応**
現業との連携強化、気候変動予測研究拠点化、etc

《国際連携》

- ✓ CMIPを通じたIPCC報告書やパリ協定への貢献